



David João Mateus Lucas

Licenciado em Ciências da Engenharia e Gestão Industrial

**Simulação de uma linha de produção com
elevada variabilidade: uma abordagem
Teoria das Restrições/DBR**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial

Orientadora: Professora Doutora Alexandra Tenera,
Professora Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Isabel Maria do Nascimento Lopes Nunes
Arguente: Prof. Doutor António João Pina da Costa Feliciano Abreu
Vogais: Eng. Fernando Manuel dos Reis Nobre
Prof. Doutora Alexandra Maria Baptista Ramos Tenera



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

[Setembro 2014]

David João Mateus Lucas

Licenciado em Ciências de Engenharia e Gestão Industrial

**Simulação de uma linha de produção com elevada variabilidade:
uma abordagem Teoria das Restrições/DBR**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

Orientadora: Prof.^a Doutora Alexandra Maria Batista dos Ramos Tenera

Setembro 2014

Simulação de uma linha de produção com elevada variabilidade: uma abordagem Teoria das Restrições/DBR

Copyright © 2014 – David João Mateus Lucas e Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

A presente dissertação encontra-se redigida ao abrigo do novo Acordo Ortográfico.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais. Presentes em todos os momentos importantes, obrigado pelos seus ensinamentos, bondade, força e felicidade proporcionada. Um orgulho.

Ao meu irmão e melhor amigo, pela sua contagiante alegria.

A Elsa Alvarez pela sua incansável ajuda, carinho e amor.

À professora Alexandra Tenera, pela oportunidade concedida de estagiar numa multinacional e pelo apoio, sugestões e orientação fundamentais para a realização da dissertação.

À Fábrica de Transformadores da Siemens, na pessoa do Eng.º Fernando Nobre, pela oportunidade de realizar o estudo. A todos os seus colaboradores pela prestação de informação ou esclarecimento de dúvidas.

Ao primo João, ao padrinho Tiago, ao compincha Solano, ao Frederico Luís e Carlos, e a todos os amigos e colegas de curso pelos incríveis momentos que vivemos.

A ti, Santiago.

RESUMO

A exigente corrida pela satisfação do cliente conduziu as organizações a uma generalizada aplicação de metodologias de melhoria contínua. Não obstante, frequentemente as expectativas não são correspondidas, levando ao insucesso destas aplicações. Para solucionar o problema vários autores defendem uma integração entre a Teoria das Restrições, Lean e Seis Sigma, denominada TLS. Ao invés de atacar, simultaneamente, todos os problemas do sistema, as equipas de melhoria devem focar-se nos elementos que impedem a organização de atingir o seu propósito.

Nesta integração a Teoria das Restrições fornece o foco na restrição, ao passo que o Lean e Seis Sigma facultam as ferramentas necessárias à implementação da melhoria, através da redução de desperdícios e variação nos pontos de alavancagem do sistema. Na sua aplicação aos sistemas produtivos, o *Drum-Buffer-Rope* (DBR) é um mecanismo fundamental para lidar com a variabilidade e potenciar o *Throughput* do sistema.

A presente dissertação é baseada na linha de produção da Fábrica de Transformadores *Siemens* do Sabugo. Recorreu-se à simulação para construir um modelo da linha de produção, identificar as restrições do sistema, verificar o impacto que a variabilidade tem no mesmo, dimensionar os seus recursos e simular as potenciais melhorias da aplicação do DBR.

Para obter uma representação fiel do sistema real foi imprescindível observar o sistema, recolher dados correspondentes ao *input* no modelo e desenvolver uma análise criteriosa dos mesmos. Em linhas com elevada variabilidade decorrente de uma produção por encomenda, a análise do *input* ganha maior importância. Para tal foi proposta uma metodologia recorrendo a métodos de inferência estatística. Os resultados do estudo indicam as melhorias obtidas com a introdução do DBR na linha de produção e validam a simulação como poderosa ferramenta no apoio à tomada de decisão.

Palavras-Chave:

Teoria das Restrições; TLS; *Drum-Buffer-Rope* (DBR); Simulação; Variabilidade; Linhas de Produção.

ABSTRACT

The demanding race for customer satisfaction led organizations to widespread application of continuous improvement methodologies. Nevertheless, expectations are often not met, leading to the failure of these applications. To solve the problem many authors advocate an integration of the Theory of Constraints, Lean and Six Sigma, called TLS. Rather than attack, simultaneously, all the problems of the system, the improvement teams should focus on the elements that hinder the organization from achieving its purpose.

In this integration the Theory of Constraints provides focus on the constraint, while Lean and Six Sigma provide the tools needed to implement the improvement through reduction of waste and variation in leverage points of the system. In its application to production systems the Drum-Buffer-Rope (DBR) is a fundamental mechanism for dealing with variability and enhance the throughput of the system.

This thesis is based on the production line of the Factory of Transformers of Siemens in Sabugo. Resorted to simulation to construct a model of the production line, identify the constraints of the system, verify the impact that variability have on it, scale their resources and simulate potential improvements of the application of DBR.

To get an accurate representation of the actual system was essential to observe the system, collect the corresponding input data in the model and develop a thorough analysis. In lines with high variability arising from a production built-to-order, analysis of input gains significance. For such a method was proposed using methods of inference statistic. The study results indicate the improvements obtained with the introduction of the DBR on the production line and validate the simulation as a powerful tool in supporting decision making.

Keywords:

Theory of Constraints; TLS; Drum-Buffer-Rope (DBR); Simulation; Variability; Production Line.

Índice Temático

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento	1
1.2.	Objetivos da Dissertação.....	2
1.3.	Metodologia	3
1.4.	Estrutura da Dissertação	4
2.	A Teoria das Restrições na Melhoria Contínua dos Sistemas Produtivos	5
2.1.	Teoria das Restrições	5
2.1.1.	Conceitos de Capacidade e Restrições	6
2.1.2.	Medidas de Desempenho.....	10
2.1.3.	Processo de Melhoria Contínua.....	11
2.1.4.	Sistema <i>Drum-Buffer-Rope</i> e <i>Buffer Management</i>	14
2.1.5.	Aplicação do DBR e <i>Buffer Management</i>	22
2.2.	Comparação da TOC com Lean e Seis Sigma	23
2.2.1.	<i>Lean Manufacturing</i>	23
2.2.2.	Seis Sigma	26
2.2.3.	Comparação entre as Metodologias: TOC, Lean e Seis Sigma.....	28
2.2.4.	A TOC e o Lean aplicado ao Balanceamento de Linhas de Produção	31
2.3.	Integração da TOC com Lean e Seis Sigma	36
3.	Simulação aplicada às Linhas de Produção.....	43
3.1.	A Simulação no mundo atual	43
3.2.	Estudo de sistemas recorrendo a Modelos de Simulação	44
3.3.	Aplicação da Simulação e <i>Softwares</i>	47
3.4.	Vantagens e Desvantagens da Simulação	49
3.5.	Etapas de um Estudo de Simulação	50

4.	Metodologia de Estudo.....	55
4.1.	Análise do <i>Input</i> num Modelo de Simulação baseado na Variabilidade de uma Linha de Produção.....	59
4.2.	Métodos de Inferência Estatística: Testes de Hipótese.....	61
4.3.	Estruturação do Dados	64
4.3.1.	Teste da Normalidade	64
4.3.2.	Teste de Comparação de Amostras independentes.....	66
4.4.	Ajustamento a uma Distribuição de Probabilidade.....	71
5.	Caso de Estudo	77
5.1.	Introdução do Caso de Estudo	77
5.1.1.	Apresentação da Organização	77
5.1.2.	Definição do Sistema e Produto	78
5.2.	Análise dos Dados Recolhidos.....	82
5.3.	Desenvolvimento do Modelo de Simulação	87
5.3.1.	Validação do Modelo.....	95
5.4.	Aplicação da TOC ao Caso em Estudo.....	98
5.4.1.	Aplicação no Modelo do <i>Drum-Buffer-Rope</i> (DBR)	103
6.	Conclusões e Recomendações.....	109
	Referências Bibliográficas.....	111
	Anexo	115

Índice de Figuras

Figura 1.1: Metodologia adotada na dissertação	3
Figura 2.1: Tipos de restrições que condicionam o sistema.....	7
Figura 2.2: <i>Throughput Accounting</i>	10
Figura 2.3: Questões em torno da Melhoria Contínua	12
Figura 2.4: Ilustração do DBR (<i>Drum-Buffer-Rope</i>).....	16
Figura 2.5: <i>Buffers</i>	18
Figura 2.6: Planeamento e Objetivos do DBR	19
Figura 2.7: Comparação entre o balanceamento dos operadores no <i>Lean</i> e TOC	33
Figura 2.8: Diferenças entre o sistema Kanban e o DBR no abastecimento da linha	35
Figura 2.9: Resumo da aplicação da TLS.....	40
Figura 2.10: Percentagem de contribuição para a poupança de custos	41
Figura 3.1: Formas de estudar o sistema e caracterização dos modelos	45
Figura 3.2: Atividades e alcance da Simulação.....	51
Figura 3.3: Etapas de um estudo de Simulação.....	52
Figura 4.1: Metodologia adotada no desenvolvimento do caso de estudo	57
Figura 4.2: Metodologia proposta para a análise do <i>input</i> no modelo de simulação	70
Figura 4.3: Metodologia adotada na segunda parte da análise do <i>input</i> no modelo.....	73
Figura 5.1: LDT - <i>Large Distribution Transformer</i>	78
Figura 5.2: Bobine (vista superior).....	79
Figura 5.3: Descrição do fluxo de material na linha de produção.....	80
Figura 5.4: Montagem dos enrolamentos	81
Figura 5.5: Modelação da entrada do enrolamento para a <i>Box</i>	91
Figura 5.6: Modelação da linha de montagem	91
Figura 5.7: Modelação da área de tratamento	92
Figura 5.8: Modelação da área preparação tintas	93
Figura 5.9: Modelação da área do reaperto	94
Figura 5.10: Modelação da área montagem final	95
Figura 5.11: <i>Lead Time</i> médio do modelo 32	97
Figura 5.12: Resultados de 10 replicações	98
Figura 5.13: Construção de cenários através do <i>Process Analyzer</i>	101
Figura 5.14: Resultados da análise de cenários	102
Figura 5.15: Solução proposta para o plano detalhado da restrição	104

Figura 5.16: Resultado das simulações para diferentes valores do <i>buffer</i> da restrição	107
Figura A.I.0.1: Modelação da entrada das entidades no sistema	115
Figura A.I.0.2: Representação da área de bobinagem no modelo do Arena	116
Figura A.I.0.3: Representação final da área de bobinagem.....	116
Figura A.I.0.4: Representação da atribuição do modelo da FS a cada entidade criada.....	117
Figura A.I.0.5: Modelação da informação relativa ao planeamento mensal da FS	118

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Comparação entre TOC, <i>Lean</i> e Seis Sigma	29
Tabela 2.2: Comparação de três integrações da TOC, <i>Lean</i> e Seis Sigma.....	37
Tabela 4.1: Teste de Hipóteses: comparação de 2 ou mais amostras independentes	66
Tabela 5.1: Características dos LDT em estudo	78
Tabela 5.2: Recolha de tempos diretamente do sistema.....	83
Tabela 5.3: Comparação dos dados recolhidos com a fonte informática	83
Tabela 5.4: Amostras recolhidas de tempos de processamento para cada modelo	84
Tabela 5.5: Comparação entre os tempos de processamento: modelos 7, 9 e 10.....	85
Tabela 5.6: Comparação entre os tempos de processamento: modelos 32 e 33.....	85
Tabela 5.7: Ajustamento dos dados a uma distribuição estatística	86
Tabela 5.8: Recursos a operar em cada processo por turno	87
Tabela 5.9: Entidades criadas por Ordem de Produção.....	88
Tabela 5.10: Máquinas de bobinagem disponíveis na linha de produção	89
Tabela 5.11: Produção atingida pela FS: 2012.....	95
Tabela 5.12: Cálculo do número de replicações para a medida de desempenho <i>lead time</i> ...	98
Tabela 5.13: Procura anual planeada para a FS.....	99
Tabela 5.14: Plano anual de entregas ao cliente.....	99
Tabela 5.15: Quadro resumo das iterações realizadas.....	101
Tabela 5.16: Carga sobre os recursos da linha de produção FS	103
Tabela 5.17: Dados de entrada no <i>Solver</i>	104
Tabela 5.18: Determinação do <i>buffer</i> na restrição.....	106
Tabela 5.19: Resumo da evolução dos resultados da aplicação da TOC/DBR.....	107

Lista de Abreviaturas e Siglas

6S	Seis Sigma
BM	<i>Buffer Management</i>
CCR	<i>Capacity-Constraint Resource</i>
CF	<i>Cash Flow</i>
DES	<i>Discrete Event Simulation</i>
DBR	<i>Drum-Buffer-Rope</i>
FS	Fábrica do Sabugo
I	<i>Inventory</i>
LDT	<i>Large Distribution Transformer</i>
LL	Lucro Líquido
LSS	<i>Lean Six Sigma</i>
OE	<i>Operating Expense</i>
OPT	<i>Optimized Production Timetables</i>
ROI	<i>Return of Investment</i>
S-DBR	<i>Simplified Drum-Buffer-Rope</i>
T	<i>Throughput</i>
TLS	<i>TOC Lean Six Sigma</i>
TOC	<i>Theory of Constraints</i>
TQM	<i>Total Quality Management</i>
UIC	<i>Ultimate Improvement Cycle</i>
WIP	<i>Work in Progress</i>

1. Introdução

1.1. Enquadramento

O permanente desafio que as organizações enfrentam para gerar lucros e aumentar a sua competitividade no mercado global orienta-as numa procura em satisfazer as necessidades do cliente, dia após dia mais exigente.

As organizações que ganham a batalha caracterizam-se por ter muita experiência em operações e processos excecionalmente aperfeiçoados. Tais qualidades são geralmente atingidas através de metodologias de melhoria contínua tais como Lean, Teoria das Restrições (TOC) ou Seis Sigma (Pirasteh & Farah, 2006).

Contudo, frequentemente as iniciativas não atingem os resultados esperados e, apesar do tempo e recursos despendidos, não são obtidas melhorias substanciais no objetivo da organização. Segundo Sproull (2009), este desfecho evidencia a falha em determinar o foco da melhoria, a área onde devem ser concentrados os esforços, e contraria a crença que a otimização local conduz à otimização global. Pelo contrário, a TOC sustenta a ideia de que o sucesso de uma organização é determinado pelo desempenho do seu elo mais fraco, e apresenta uma metodologia dirigida a elevar a restrição do sistema. A organização progride em direção ao objetivo ultrapassando a sua restrição principal, pelo que, o foco das ações de melhoria deve ser conduzido para esta área.

Sendo hoje a TOC aplicada nas mais diversas áreas, a sua origem deriva dos sistemas produtivos, a área em foco nesta dissertação. A sua aplicação na programação da produção denomina-se *Drum-Buffer-Rope* (DBR). Este mecanismo foi idealizado para resolver um conjunto de problemas presentes nas linhas de produção tradicionais, tendo como objetivo proteger a restrição do sistema, e por conseguinte o sistema como um todo, contra a dependência e variabilidade dos processos.

A Simulação é uma poderosa ferramenta com capacidades reconhecidas tanto no que diz respeito à conceção de novos sistemas como na compreensão e análise de sistemas já existentes. A sua aplicação nos sistemas produtivos vai desde o balanceamento de linha, ao planeamento de recursos e equipamentos ou ao *layout* de uma instalação. O facto de permitir testar de modo *offline*, isto é, sem interromper o normal funcionamento do sistema, diversos cenários alternativos, permite ao gestor verificar o resultado de diferentes soluções o que constitui um elemento determinante na ajuda e suporte à tomada de decisão. Para Ricketts (2008) este facto é particularmente importante quando a TOC está a ser introduzida.

O presente estudo insere-se num projeto de colaboração com a Fábrica de Transformadores da *Siemens*, localizada no Sabugo. A sua linha de produção responde a uma procura crescente por um produto personalizado, o que implica o fabrico de múltiplos transformadores com características

idênticas. Esta especificidade, que resulta de uma produção por encomenda, traz elevada variabilidade à sua linha de produção pois embora muitos produtos tenham o mesmo fluxo produtivo, as suas características técnicas, dimensões ou diferentes operações de montagem, introduzem substanciais variações nos seus tempos de processamento.

A replicação dos sistemas reais através da simulação requer modelos simplificados mas que sejam representações fiéis da realidade. No desenvolvimento de um modelo de uma linha de produção com elevada variabilidade a análise dos dados recolhidos ganha uma preponderância decisiva. Os resultados e recomendações provenientes da simulação são tão legítimos quanto o modelo e os seus *inputs*.

1.2. Objetivos da Dissertação

Pretende-se com este estudo explorar os benefícios, para um sistema produtivo, da introdução de uma metodologia de melhoria contínua que resulta da integração da Teoria das Restrições com o Lean e Seis Sigma, a TLS. O objetivo central da dissertação é aplicar a TLS recorrendo à simulação, procurando obter melhorias substanciais no sistema real e testar diferentes cenários alternativos sem interromper o seu normal funcionamento.

Por outro lado, devido à elevada variabilidade presente na duração das operações da linha de produção em questão, também se ambiciona desenvolver e aplicar uma metodologia para tratar os dados recolhidos do sistema e construir um modelo simplificado mas que traduza a variabilidade da linha.

De acordo com o exposto, podem-se enumerar quatro objetivos que a dissertação procura atingir:

- ❖ *Análise do Input*: em primeiro lugar pretende-se verificar, através dos tempos de processamento, que modelos são significativamente diferentes entre si de forma a serem modelados separadamente. De seguida pretende-se ajustar cada conjunto de dados a uma distribuição estatística que melhor represente o seu comportamento.
- ❖ Desenvolver um modelo de simulação que seja uma representação fiel do comportamento da linha de produção da Fábrica do Sabugo.
- ❖ Dimensionar, tendo em conta a procura prevista, os recursos afetos à linha de produção.
- ❖ Aplicar os conceitos da TOC e do *Drum-Buffer-Rope* (DBR), ao modelo da linha de produção, comparando cenários alternativos.

1.3. Metodologia

A figura 1.1 apresenta uma síntese da metodologia adotada na dissertação. O processo inicia-se com a revisão da Teoria das Restrições com o intuito de ser explorada, no seguimento, a sua integração com outras metodologias de melhoria contínua e por fim realizar uma análise crítica de como essa integração pode provocar benefícios nos sistemas produtivos.

Para testar esses benefícios, e como a dissertação se insere num projeto desenvolvido numa fábrica, foi necessário encontrar uma ferramenta onde fosse exequível testar as ideias da TOC, e realizar experiências, sem provocar alterações físicas no sistema. Assim, adotou-se a simulação e o *software* ARENA para reproduzir o comportamento do sistema e testar possíveis soluções.

Previamente à construção do modelo, durante a observação e recolha de dados do sistema, constatou-se uma elevada variabilidade na duração das operações. Esta problemática conduziu a que fosse necessária uma análise rigorosa dos dados recolhidos de modo a que o *input* no modelo reproduzisse as características da linha de produção.

Analisado o *input*, procedeu-se então à construção do modelo no *software* referido. Juntamente com os responsáveis do projeto, o modelo foi validado através de uma comparação com o sistema real, antes da aplicação dos conceitos da TOC e do *Drum-Buffer-Rope*.

Por último foram analisados os resultados, efetuadas comparações de cenários, retiradas as conclusões essenciais e realizadas recomendações para futuras investigações.

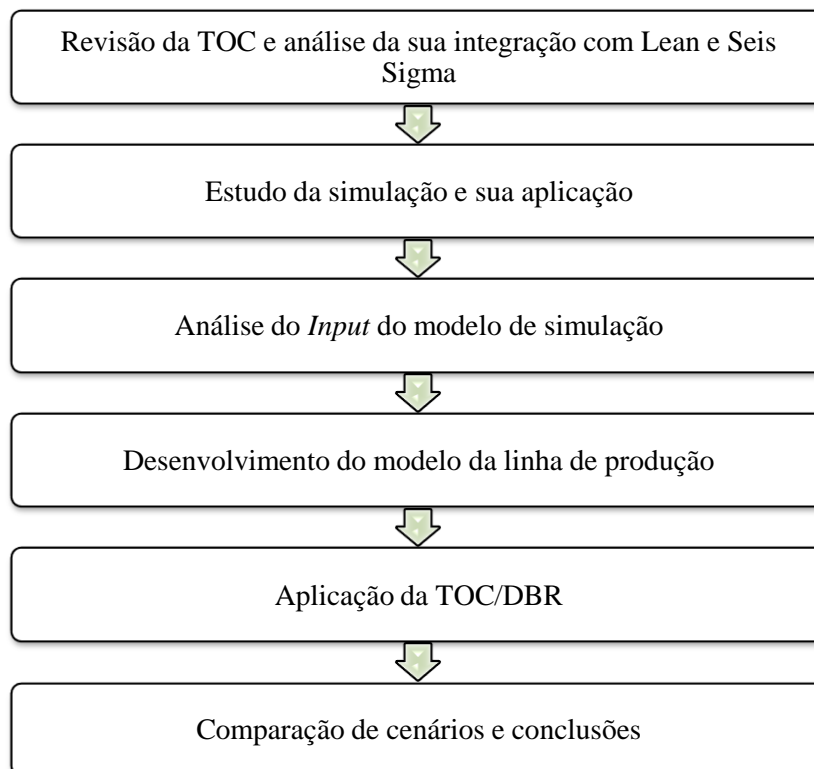


Figura 1.1: Metodologia adotada na dissertação

1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está organizada em seis capítulos. O capítulo inicial contém uma breve introdução à temática abordada sendo na sequência enumerados os objetivos do estudo, a metodologia adotada e a estrutura do texto.

No segundo capítulo são apresentados os fundamentos da Teoria das Restrições e o seu mecanismo que gere as operações nos sistemas produtivos, o *Drum-Buffer-Rope*. No seguimento, o capítulo contém uma segunda secção onde a Teoria das Restrições é comparada com duas outras metodologias: Lean e Seis Sigma. Por fim, é analisada a integração das três metodologias como solução para muitos dos problemas existentes nas organizações.

No capítulo três, são revistos os principais conceitos ligados à simulação, a sua aplicação às linhas de produção e são também descritas as etapas a perfazer num estudo deste tipo.

O quarto capítulo é composto pela metodologia adotada no desenvolvimento do caso de estudo. Esta parte do texto centra-se principalmente na análise do *input* do modelo de simulação e apresenta as metodologias que se pretendem aplicar para esse efeito, compostas por diversos testes de hipóteses.

No quinto capítulo é abordado o caso de estudo. Após a apresentação da organização e definição do seu sistema produtivo, as metodologias referidas no capítulo anterior são aplicadas aos dados recolhidos do sistema real. De seguida é apresentado o modelo de simulação desenvolvido e os resultados das diversas simulações realizadas, com a aplicação dos conceitos da Teoria das Restrições.

Por fim, o capítulo que encerra a dissertação contém as comparações entre os diferentes cenários, as conclusões finais e as propostas de melhoria.

2. A Teoria das Restrições na Melhoria Contínua dos Sistemas Produtivos

2.1. Teoria das Restrições

Teoria das Restrições, também designada por Teoria dos Constrangimentos ou *Theory of Constraints* (TOC), é uma metodologia de melhoria contínua desenvolvida por Goldratt que reconhece que a restrição de um sistema, o seu elo mais fraco, determina o sucesso de uma organização (Sproull, 2009).

Referida por vários autores como filosofia (TOCICO, 2012; Youngman, 2009) ou ciência de gestão (McMullen, 1998), a TOC procura ir ao encontro do objetivo de um sistema através da compreensão das causas e efeitos, que a dependência e variabilidade têm no sistema subjacente.

No início da década de oitenta, Goldratt desenvolveu um *software* de planeamento da produção denominado OPT – *Optimized Production Technology* – que se focava na gestão das capacidades dos recursos com restrições e que conduzia à otimização dos *outputs* dos sistemas de produção (Roldão & Ribeiro, 2007). A implementação do *software* trouxe alguns problemas e, de modo a educar os gestores das organizações que o usavam, Goldratt e Cox escreveram *The Goal* (Goldratt & Cox, 2004), livro que contém uma série de conceitos e princípios, destinados a assegurar a melhoria no desempenho global das organizações através do foco nos pontos críticos do sistema, e que se tornaram a base para a Teoria das Restrições.

O referido *software* evoluiu posteriormente para um conjunto de ferramentas integradas de gestão, que abrangem três áreas inter-relacionadas: logística/produção, medidas de desempenho e ferramentas de reflexão (*Thinking Process*) (Gupta, Bhardwaj, & Kanda, 2010).

Segundo McMullen (1998), a Teoria das Restrições consiste numa ciência de gestão que aplica métodos da física a problemas gerais de otimização. Como física de melhoria de desempenho, utiliza relações de causa-efeito procurando que um pequeno número de simples conceitos proporcione o máximo de poder explicativo e de previsão. As melhores soluções surgem, num plano inicial, após o gestor se questionar “Qual é o objetivo da organização?”.

O primeiro pré-requisito para implementar a TOC é assim definir o sistema sob investigação e identificar o seu propósito (Watson, Blackstone, & Gardiner, 2007). Um sistema pode ser um indivíduo, uma máquina, uma organização ou um grupo de pessoas ou empresas que partilham um objetivo. Uma das premissas da TOC é que todo e qualquer sistema tem um objetivo, determinado pelos seus proprietários, mensurável e sujeito a determinadas condições estabelecidas pelos seus intervenientes tais como regras ambientais, segurança no trabalho, impostos ou preços competitivos.

Para o sistema manter o seu normal funcionamento, estas condições têm de ser cumpridas pois representam as necessidades de clientes e funcionários (McMullen, 1998).

Goldratt e Cox (2004) começam por clarificar que qualquer que seja a organização com fins lucrativos existe um único objetivo, que consiste em realizar dinheiro. Já a produtividade é o ato de tornar uma empresa mais perto do seu objetivo. Para McMullen (1998) o objetivo não é necessariamente fazer dinheiro pois diferentes sistemas podem ter diferentes objetivos.

Definido o propósito de cada organização, a TOC concentra todos os seus esforços em promover melhorias que se traduzam diretamente nesse propósito, e forçosamente, no aumento do desempenho global da organização, sendo essas melhorias efetuadas em pontos fulcrais do sistema.

Contrariamente às práticas tradicionais é abandonada a ideia de que melhorar cada parte do sistema aumenta a sua *performance* geral: “Manter o foco em tudo é sinónimo de não se focar em nada”. Tendo um sistema inúmeras atividades passíveis de ser melhoradas, a falta de tempo, recursos ou disponibilidade financeira torna necessário focar as ações nos elementos que ditam o resultado das organizações – as restrições – devendo o sistema funcionar em função das mesmas. Este conceito ganha extrema importância quando existem interdependências entre os elementos do sistema e por isso alta variabilidade. Nestes sistemas o número de restrições é reduzido: “0,1% dos elementos de uma organização podem ditar 99,9% do resultado” (Cox & Schleier, 2010).

2.1.1. Conceitos de Capacidade e Restrições

Sabendo que o elo mais fraco é determinante para o sucesso de uma organização, e antes de enunciar a metodologia subjacente à TOC e suas ferramentas, é importante explorar os conceitos de restrição e capacidade, essenciais à sua compreensão e aplicação nos sistemas produtivos. Rahman (1998) sumariza o conceito da Teoria das Restrições em dois pontos:

-Todos os sistemas têm pelo menos uma restrição, caso contrário seria possível a uma organização gerar lucro ilimitado. A restrição é definida como tudo o que limita a organização de realizar o seu propósito, agora e no futuro (Goldratt & Cox, 2004).

-Ao contrário do convencionado, a existência de restrições não representa algo negativo, mas sim uma oportunidade de melhoria. Como a restrição determina o desempenho do sistema, a sua melhoria traduz-se diretamente na *performance* de toda a organização.

Pelo exposto, todos os sistemas têm assim pelo menos uma restrição, que deve ser vista como uma oportunidade de melhoria, e que ao ser quebrada, eleva o desempenho global do sistema.

Existem vários tipos de restrição que condicionam um sistema. Goldratt e Fox (1986), Sproull (2009) e McMullen (1998) mencionam que dois tipos de restrição impedem o progresso de uma organização:

as restrições físicas (equipamentos, materiais, pessoas, qualificação dos operadores, procura etc.) e as restrições políticas ou de gestão (regras, regulamentos, procedimentos, falta de informação, etc.). Uma opinião diferente tem Watson et al. (2007) e Roldão e Ribeiro (2007), que consideram três tipos de restrições, separando as restrições físicas em duas. Watson acrescenta a restrição do mercado, enquanto Roldão e Ribeiro adicionam a restrição humana que consiste nos comportamentos, atitudes ou qualificações dos operadores.

A figura seguinte (Fig. 2.1) resume os tipos de restrições e o que as caracteriza em relação à capacidade da organização. Foram definidas três tipos de restrições, divididas em dois grupos, externas e internas:

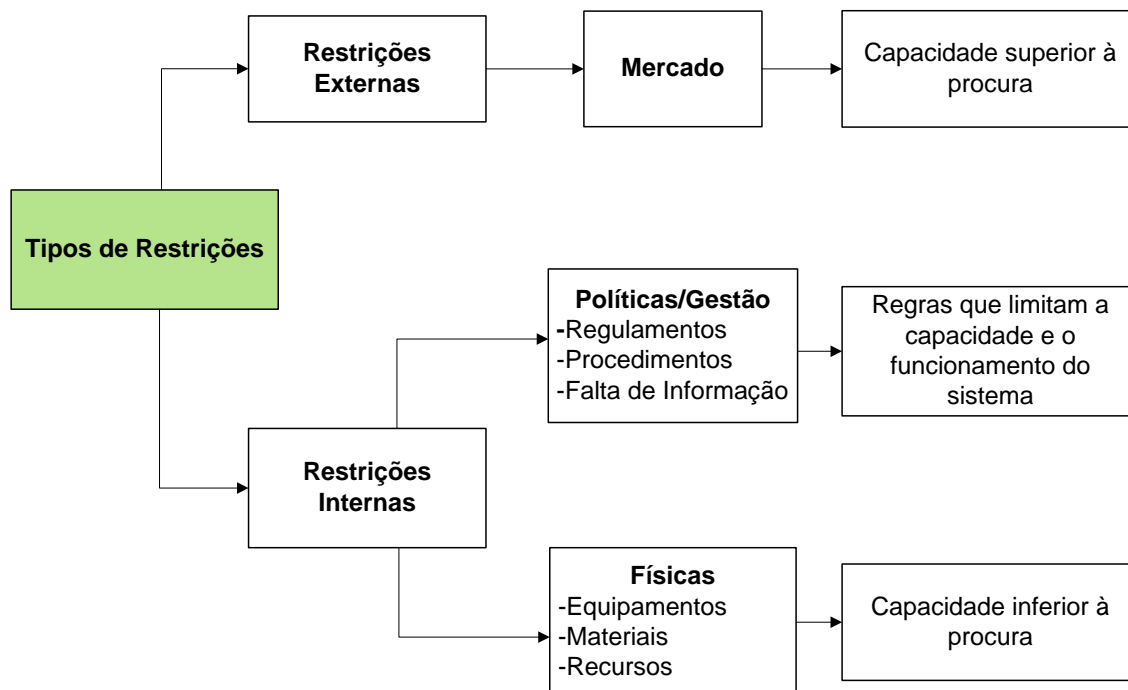


Figura 2.1: Tipos de restrições que condicionam o sistema

Uma restrição interna indica que o elo mais fraco do sistema está localizado dentro da organização. Neste grupo, as restrições físicas são as mais fáceis de localizar e ultrapassar, pois o seu efeito pode ser constatado fisicamente através de observação direta ou em discussões com os operadores. Este tipo de restrição afeta diretamente a capacidade do sistema, definida como a quantidade de *output* que um sistema pode realizar por unidade de tempo (Roldão & Ribeiro, 2007). Goldratt, alerta no entanto, para o facto de geralmente as organizações terem poucas restrições físicas e muitas políticas ou de gestão. Uma restrição política pode ser a indicação para a utilização de lotes de produção de dimensão elevada de modo a aumentar a eficiência de produção, mas mais dispendiosos devido aos tempos de processamento maiores, resultando na perda de flexibilidade e aumento de inventários (Ramos, 2010). As restrições políticas podem ser quaisquer características inerentes ao negócio que entrem em conflito com os objetivos da organização e impeçam o sistema de atingir a sua capacidade potencial.

Quando a restrição se move para fora do sistema, isto é, quando a fábrica tiver mais capacidade que a requisitada pelo mercado a restrição passa a ser externa. Uma correta implementação da TOC implica esta alteração. No entanto, as melhorias introduzidas abrem novas oportunidades para aumentar as vendas e fornecer à organização uma decisiva vantagem competitiva. Neste caso, a empresa deve se focar em capitalizar essa vantagem competitiva (traduzi-la em vendas) em vez de se distrair com a melhoria contínua das suas operações (Cox & Schleier, 2010).

Outro dos fundamentos que está na base da teoria desenvolvida por Goldratt refere que a capacidade de uma instalação é igual à capacidade da sua maior restrição. Ao invés de procurar balancear a capacidade de todos os recursos do sistema com o mercado, a TOC assume a necessidade de alguns recursos terem capacidade extra. Esta capacidade é fundamental devido a duas características presentes nos sistemas, que influenciam toda a gestão do fluxo produtivo de uma instalação (Cox & Schleier, 2010):

-Elevado grau de Dependência: certas operações ou atividades apenas podem ter o seu início após determinadas operações/atividades estarem completas. Devido a esta dependência, o desempenho de qualquer recurso é influenciado pelo desempenho dos recursos a montante.

-Elevado grau de Variabilidade: a variabilidade está presente nos sistemas produtivos tanto na forma de eventos aleatórios (atividades que tomam lugar em intervalos irregulares, sem comportamento padrão e pela sua natureza imprevisíveis) como de flutuações estatísticas (todos os processos tem algum grau inerente de variabilidade).

A combinação entre estas duas características torna a missão de controlar o desempenho de um sistema produtivo extremamente difícil. O dia-a-dia do gestor não é mais do que uma tentativa de fazer face às inúmeras interrupções no fluxo do sistema e ao seu impacto nas restantes atividades.

A tradicional tarefa de balancear a capacidade de todos recursos com o mercado também é dificultada por estas características. Num sistema produtivo, os recursos a jusante apenas sentem o impacto das variações negativas nos processos precedentes (as variações positivas não os fazem antecipar a operação), e a menos que tenham capacidade para recuperar, estes vão se constantemente atrasando. Numa fábrica perfeitamente balanceada, esta capacidade extra não existe, e consequentemente ou esta funciona de forma ineficaz ou é obrigada a adquirir mais capacidade (recorrendo por exemplo a turnos extras) obrigando os gestores a gerir uma fábrica não balanceada (Cox & Schleier, 2010).

A TOC defende, que ao invés de se balancear a capacidade de uma fábrica com a procura do mercado, a regra deve ser balancear a cadência (fluxo produtivo) com a procura. Quem define a cadência da organização, o ritmo de produção, é a sua restrição principal também denominada de recurso limitante ou *bottleneck*. A ideia é fazer com que o fluxo sobre a restrição principal seja igual à procura do

mercado. Os restantes elementos necessitam de ter capacidade extra. Para fazer face a estas características Goldratt e Cox (2004) definem assim dois tipos de recursos:

Restrição Principal ou Recurso Restritivo/Limitante: qualquer recurso, cuja capacidade é igual ou inferior à procura colocada sobre ele. É o recurso que comanda a produção, o mais lento.

Recurso Não-Restritivo: qualquer recurso que tenha capacidade superior à procura colocada sobre ele.

Por definição, os recursos não-restritivos têm capacidade extra, isto é, perfazem a procura mais rapidamente que os recursos limitantes. Se produzirem durante essa capacidade extra, a consequência é que as existências acumulam-se em frente às restrições principais pois estas não conseguem corresponder. O nível de utilização de um recurso não-restritivo não é determinado pelo seu potencial, mas pela principal restrição do sistema. Em produtos cujo fluxo de produção não passe por recursos limitantes, os recursos não-restritivos só devem produzir o que a procura conseguir absorver, pois a sua restrição está no mercado (Goldratt & Cox, 2004).

A síndrome da eficiência é um comportamento padrão presente em numerosas organizações, sendo responsável por muitas das dificuldades encontradas nos sistemas produtivos. Os operadores não querem ser “apanhados” inativos, os supervisores estão sempre à procura de trabalho para os seus subordinados e os gestores esforçam-se por ter altos níveis de eficiência. A consequência da procura por uma elevada eficiência em todas as estações de trabalho, é que o material é libertado para a produção antes de tempo, crescem as filas de espera nos recursos restritivos, aumentam os *lead time*, enquanto os prazos de entrega do produto ao cliente não são cumpridos, ou exigem uma aceleração de todo o sistema com o recurso a horas extraordinárias. Este método de trabalho resulta numa organização ineficiente, que não cumpre os prazos de entrega, e num sistema com elevadas despesas operacionais e existências (Bhardwaj, Gupta, & Kanda, 2010), pelo que uma fábrica onde todos os recursos trabalham a 100% será ineficiente (Goldratt & Cox, 2004).

A crença que a otimização local de algum modo conduz à otimização global está fortemente enraizada. Alterar a perceção que a utilização máxima de todos os recursos é positiva para a empresa é deveras complicado, e enquanto não for ultrapassada esta restrição política, as restrições físicas não podem ser exploradas (Ricketts, 2008). Como não é possível, nem desejável, atingir uma fábrica perfeitamente balanceada, a maioria das operações deve conter uma capacidade disponível, sendo essa capacidade extra que permite à TOC conceber um sistema, através do DBR (exposto no capítulo 2.1.4), no qual são as operações como um todo que tornam o sistema fiável (Cox & Schleier, 2010).

2.1.2. Medidas de Desempenho

Cada ação ou decisão tomada por uma organização deve ser julgada pelo impacto que tem no seu propósito (Sproull, 2009). De forma a avaliar o desempenho global de uma organização em termos do seu objetivo, Goldratt e Cox (2004) desenvolveram um sistema de medidas de desempenho - *Throughput Accounting* - focado no processo, que permite à organização atuar de forma a aumentar o desempenho do sistema. O *Throughput Accounting*, resumido na figura 2.2, consiste num conjunto de medidas interrelacionadas que devem ser usadas nos vários níveis organizacionais (Watson et al., 2007) e que preenchem a lacuna existente entre o desempenho da organização a nível financeiro e os processos ao nível da produção. Foram assim propostas três medidas de desempenho ao nível das operações, as Receitas (*T - Throughput*), Investimento (*I - Inventory*) e as Despesas Operacionais (*OE - Operating Expense*) (Tenera, 2006):

Receitas (*T*) - Taxa a que o sistema gera dinheiro através das vendas por unidade de tempo. De salientar que um produto acabado que não seja vendido não é considerado receita. É representado pelas vendas menos custos variáveis totais. Sobem as vendas, aumenta o *T*.

Investimento (*I*) – Representa o dinheiro que está atualmente no sistema. É todo o investimento realizado em bens que a organização tem intenção ou pode optar por vender. Investimentos em imóveis, edifícios, máquinas, ferramentas, WIP (*Work in Progress*) ou matéria-prima incluem-se nesta definição (Gupta et al., 2010).

Despesas operacionais (*OE*) - São as necessidades do sistema para continuar em pleno funcionamento (McMullen, 1998). É todo o dinheiro que o sistema gasta de modo a tornar o investimento em receitas como por exemplo os custos de mão-de-obra, *outsourcing* ou de transporte. Não existe distinção entre custos diretos ou indiretos, ou de curto e longo prazo (Gupta et al., 2010).

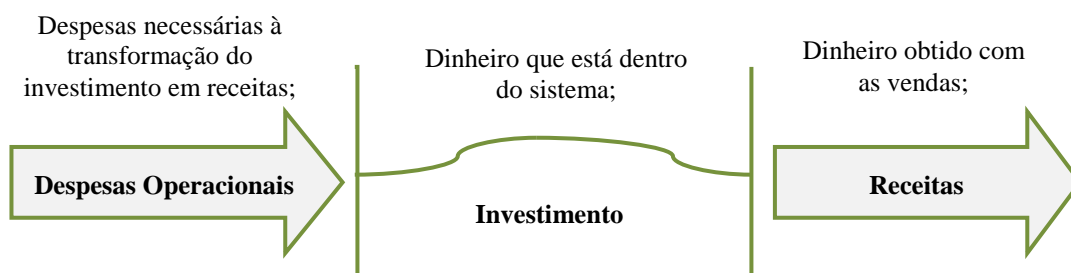


Figura 2.2: *Throughput Accounting*

Adaptado: http://www.infosysblogs.com/bpo/2012/06/theory_of_constraints_part_3.html em 19/01/2014

Nesta escala, o *T* é a medida mais importante, seguida do *I* – devido à sua importância para as receitas – e por fim as *OE*. A base lógica para esta ordem de prioridade está no facto dos proveitos da redução de despesas e investimentos serem finitos, e teoricamente, um incremento do *T*, proveniente de um aumento das vendas, é ilimitado (Rahman, 1998). A organização, para atingir o seu objetivo, deve

procurar aumentar o seu T enquanto simultaneamente reduz as OE e o I . A produção para *stock* deve ser evitada pois não aumenta o T e ainda engrandece o I e as OE .

A gestão tradicional dá prioridade em primeiro lugar à redução de despesas operacionais, em segundo lugar ao aumento de *outputs*, em último lugar à redução do imobilizado. A filosofia de gestão desenvolvida por *Goldratt*, tem como meta maximizar os *outputs* minimizando os *inputs* (Roldão & Ribeiro, 2007). Ao contrário do passado, onde melhorias no processo eram sinónimo de redução de custos, e o resultado global do sistema era igual à soma dos resultados obtidos em cada local, a implicação dos conceitos da TOC é que não se deve procurar otimizar cada processo do sistema, deve-se ver a organização como uma unidade, esta filosofia propõe a mudança do “mundo do custo” para o “mundo do T ”.

A partir das referidas medidas de desempenho operacionais, a TOC define como medidas globais o Lucro Líquido, LL (Equação 2.1), a rentabilidade do investimento, ROI (Equação 2.2), e o Cash-Flow CF (Equação 2.3), do seguinte modo (Tenera, 2006):

$$LL = T - OE \quad (2.1)$$

$$ROI = \frac{T - OE}{I} \quad (2.2)$$

$$CF = T - OE \pm \Delta I \quad (2.3)$$

Visto as medidas de desempenho estarem relacionadas é possível verificar o impacto das medidas operacionais nas medidas globais. Exemplificando, com o aumento do T sem afetar o I e as OE , todas as três medidas globais sofrem uma melhoria. As medidas de desempenho operacionais também podem ser usadas para descrever outras medidas, como a produtividade (rácio entre T e OE) (Rahman, 1998).

2.1.3. Processo de Melhoria Contínua

Vários autores propõem a analogia com uma corrente para demonstrar importância da restrição no desempenho de um sistema. Tal como os elos da corrente atuam em conjunto para transmitir um movimento/força comum, os vários departamentos ou divisões de uma fábrica trabalham em conjunto para atingir um mesmo objetivo. Para melhorar o desempenho da corrente é necessário reforçar o seu elo mais fraco, a sua restrição, pois é este o elemento que limita o desempenho global da mesma. Uma vez aperfeiçoada a ligação mais fraca, outra ligação poderá surgir como restrição do sistema. O processo de melhoria é assim iterativo e contínuo, e não uma tentativa única (Gupta et al., 2010; Roldão & Ribeiro, 2007).

Para melhorar um sistema é necessário mudar, mas nem todas as alterações se traduzem verdadeiramente em melhorias. A problemática da mudança é o coração da melhoria contínua

(Woeppel, 2009). Segundo vários autores como Sproull (2009) e McMullen (1998) um processo de melhoria contínua é inspirado em três questões ilustradas na figura 2.3.

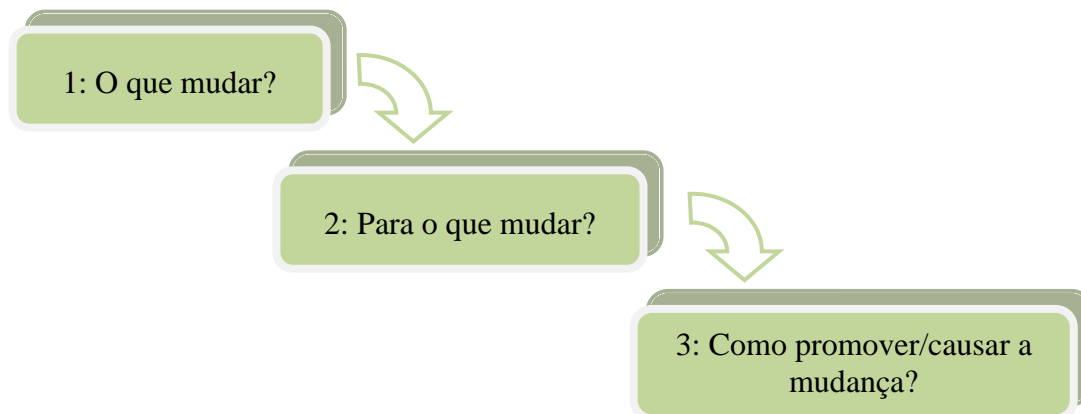


Figura 2.3: Questões em torno da Melhoria Contínua

A resposta a estas três questões, não sendo óbvia nem fácil de determinar, é um fator determinante para o sucesso de uma organização. A primeira questão refere-se à área em que nos devemos focar, o elo mais fraco do sistema. Em todas as organizações, existem inúmeros processos com potencial para serem aperfeiçoados, é necessário verificar quais têm maior contribuição para a empresa, maior impacto no seu *T*. Em sequência, a segunda questão prende-se com os objetivos da melhoria, como menores tempos de ciclo ou menos paragens nos recursos restritivos. Por último, a terceira questão auxilia na escolha das técnicas ou ferramentas que se irão aplicar (Sproull, 2009).

De forma a dar resposta às questões enunciadas, Goldratt em *The Goal* (Goldratt & Cox, 2004), descreveu o processo de melhoria contínua da Teoria das Restrições em cinco passos:

- 1º Passo:** IDENTIFICAR a restrição/restrições do sistema;
- 2º Passo:** Decidir como EXPLORAR a restrição do sistema;
- 3º Passo:** SUBORDINAR o resto do sistema ao passo anterior;
- 4º Passo:** ELEVAR a principal restrição do sistema;
- 5º Passo:** Se no passo anterior a restrição foi quebrada, voltar ao 1º passo.

Identificação das restrições

Se o desempenho de um sistema é limitado, por definição, pela sua restrição, a primeira ação deve ser identifica-la. O tempo é a restrição primária do ser humano, manter o foco dos gestores em identificar e atuar nas restrições que causam maior impacto no sistema é usar eficazmente esta variável escassa (McMullen, 1998).

Este deve ser o ponto de partida para qualquer iniciativa de melhoria, simplesmente porque é o que oferece a melhor oportunidade de elevar os lucros num curto período de tempo. É na área da restrição que se devem focar os esforços, respondendo à pergunta “O que mudar?” (Sroull, 2009).

Caso se trate de uma restrição física, começa-se por determinar a procura total sobre os produtos da organização e o tempo disponível para produção de cada recurso. Se o tempo disponível para produção de um determinado recurso é igual ou menor que a procura, esse recurso é a restrição do sistema. Como os recursos limitantes não conseguem ter um fluxo de peças suficiente para fazer face à procura e cumprir o objetivo, é necessário encontrar mais capacidade e avança-se assim para o segundo passo. Estas restrições tendem a ser os processos com maiores filas, ou provêm destes processos as peças que fazem a linha parar a produção.

Explorar a restrição

O passo seguinte consiste em explorar a restrição principal, melhorar o seu processo. Caso a restrição seja física, isso pode ser conseguido através da eliminação de tempos de desperdício, modificações nos equipamentos, uma diferente alocação de recursos, ou diminuindo a carga que passa na restrição, encontrando processos idênticos, mesmo menos eficientes, que também possam receber as peças, ou recorrendo ao *outsourcing*. Formação dos operadores ou modificação na movimentação de materiais, entre outras, são áreas suscetíveis de ser melhoradas. No caso de restrições políticas o objetivo não é ser explorada, mas sim eliminada e substituída por uma nova política ou regulamento que suporte o aumento de T . O segundo passo dá resposta à questão “Para o que mudar?”.

Subordinar o sistema à restrição

O terceiro passo consiste em ajustar todos componentes do sistema à restrição de forma a suportar a sua máxima eficiência. Deve haver sincronização entre a restrição principal e os restantes recursos. As suas atividades, gama e velocidade devem satisfazer os requisitos da restrição. Como a restrição principal determina o ritmo do sistema, é consoante a sua velocidade que o material deve entrar no sistema. A consequência da aplicação deste passo numa fábrica, é um fluxo produtivo mais suave e uma queda nas existências, as peças chegam à restrição do sistema no momento certo. A eficiência em cada recurso não-restritivo tende a descer, no entanto, esta só pode aumentar com o incremento de encomendas/vendas.

Elevar a restrição do sistema

Com o aumento da capacidade da restrição, e efetuado o ajustamento do sistema, a próxima ação é procurar maximizar a utilização de todo o sistema, aproveitando o potencial dos recursos não-

restritivos. Se a restrição ainda não tiver sido quebrada com os dois passos anteriores é inevitável tomar outro tipo de ações como recorrer a horas extraordinárias, outro turno, adicionar equipamento, pessoas ou em último caso alterar radicalmente o processo, por exemplo através da automação de recursos.

A organização avança para um nível superior em relação ao objetivo até uma nova restrição aparecer no sistema. Segundo Sproull (2009), o terceiro e o quarto passo da TOC respondem parcialmente à terceira questão “Como promover\causar a mudança?”.

Voltar ao primeiro passo

Se nos processos anteriores, a restrição inicial for quebrada, o processo de melhoria contínua recomeça identificando-se uma nova restrição. É essencial a organização reconhecer as contantes mudanças no ambiente produtivo e agir em conformidade, de forma a não permitir que a inercia cause uma restrição no sistema. O ciclo é repetido conduzindo a empresa a sucessivos melhoramentos nas suas operações e desempenho (Goldratt & Cox, 2004; Gupta et al., 2010; Roldão & Ribeiro, 2007; Sproull, 2009).

Segundo Gupta et al. (2010) o ciclo de melhoria da TOC pode ser aplicado a qualquer processo, nas mais diferentes organizações e em qualquer nível de gestão, contudo, os seus melhores resultados derivam de três ações:

- 1) Compreender as interdependências entre e através dos processos utilizados para entregar o produto ou o serviço ao cliente;
- 2) Compreender o impacto dessas interdependências e a variabilidade do processo no desempenho geral do sistema;
- 3) Para um desempenho previsível e consistente, é necessário usar reservas (*buffers*) apropriados às interdependências e variabilidade dos processos.

2.1.4. Sistema *Drum-Buffer-Rope* (DBR) e *Buffer Management* (BM)

A aplicação da Teoria das Restrições à produção é realizada através do *Drum-Buffer-Rope* (DBR) mecanismo apresentado por Goldratt e Fox (1986) no seu segundo livro, *The race*, para gerir as operações nos sistemas produtivos. O seu objetivo é proteger o elo mais fraco do sistema, e por conseguinte o sistema como um todo, contra a dependência e variabilidade dos processos. Enquanto o DBR é o mecanismo de configuração do sistema, o motor da produção, o *Buffer Management* (BM) trata de monitorizar o sistema de forma a conduzir o motor a atingir a sua máxima performance (Youngman, 2009).

Esta ferramenta da TOC foi idealizada para resolver um conjunto de problemas presentes nas linhas de produção tradicionais, como as enormes quantidades de existências que permanecem antes, durante, e após a produção, e que não traduzem o investimento em receitas. O elevado WIP provoca uma extrema dificuldade em supervisionar os prazos de entrega e dar prioridade às ordens de produção mais urgentes. Devido à falta de controlo, os gestores não conseguem prever as datas de entrega, surgem frequentemente atrasos, o que se traduz na insatisfação do consumidor ou em vendas perdidas.

Na procura de maximizar a utilização de recursos, as ordens de produção eram “puxadas” para a linha. O pressuposto de que toda a capacidade não utilizada pelos recursos representa uma oportunidade perdida para a organização, embora atraente, é falso. Produzir bens que o cliente não adquira significa desperdício, e mesmo quando o cliente os compra, o impulso para a máxima utilização supera a restrição (Ricketts, 2008).

Uma representação do sistema DBR pode ser visualizada na figura 2.4. Este mecanismo é composto por três elementos principais, o Tambor (*Drum*), a Reserva (designado no texto por *Buffer*) e a Corda (*Rope*), nomes que surgiram de metáforas usadas no livro *The Goal* (Goldratt & Cox, 2004):

Tambor: É a principal restrição do sistema ou o CCR (*Capacity-Constraint Resource*). Este recurso processa as ordens de produção numa sequência específica, baseada no prazo de entrega de encomendas aos clientes e na sua capacidade finita (TOCICO, 2012). O seu planeamento marca o ritmo do sistema produtivo e a menos que a restrição esteja no mercado, a sua capacidade (taxa a que processa unidades) determina a taxa de *output* do sistema (McMullen, 1998).

O CCR é definido como qualquer recurso cuja capacidade, se não for bem gerida, irá provavelmente comprometer o *T* da organização (TOCICO, 2012). De referir que este recurso não é a restrição principal do sistema, pois tem capacidade superior à procura. Contudo, quando a restrição está no mercado, é o recurso com menor capacidade e sobre o qual é baseado o planeamento. Assim, CCR é um recurso com potencial para se tornar uma restrição embora não o seja atualmente, porque nem sempre tem capacidade extra suficiente para “sprintar” e completar as ordens a tempo. Sempre que a restrição principal é explorada e o sistema ganha capacidade, os CCR também precisam de capacidade adicional ou tornam-se na nova restrição (Ricketts, 2008).

Buffer: De modo a proteger o *output* do sistema das flutuações estatísticas e variações imprevistas nos processos, é mantida uma quantidade suficiente de WIP, medida em unidades temporais, entre dois pontos específicos do sistema. Este elemento é assim composto por duas dimensões: tempo e espaço (Sproull, 2009). Segundo Cox e Schleier (2010) uma linha de produção com um recurso restritivo deve conter dois *buffers*, o *buffer* da restrição e o *buffer* de expedição. O primeiro é medido desde o ponto de libertação de material para o sistema até à restrição e protege a mesma de interrupções nos processos a montante. Goldratt (1990) define o *buffer* como o intervalo de tempo em que se antecede a

libertação de material, relativamente à data planeada em que a restrição consome esse material. O *buffer* de expedição é medido desde a restrição até ao local de expedição do produto acabado, protegendo a data de entrega do produto ao cliente.

Para Cox e Schleier (2010) os *buffers* representam o *lead time* adicional permitido, para além do tempo de processamento e de *setup*, que os materiais têm para “viajarem” entre dois pontos específicos do sistema. Num mundo livre de perturbações, tais como avarias em equipamentos, o *Lead Time* da Produção – tempo de transformação da matéria-prima no produto acabado – pode ser simplesmente igual à soma dos tempos de processamento e dos tempos de *setup* de cada operação do sistema produtivo. No mundo real, com as inevitáveis e aleatórias perturbações que ocorrem nos sistemas, o *lead time* planeado tem de ser obrigatoriamente maior que a adição dos dois conjuntos de tempos. Contudo, sempre que uma operação é sujeita à variabilidade do sistema a sua duração real será diferente de qualquer plano que não contenha, de alguma forma, um determinado tempo de segurança. Este é o conceito intrínseco ao *buffer* (ou reserva), e o que o torna único é o reconhecimento que o objetivo não consiste em proteger a capacidade de cada operação de cumprir o planeamento, mas apenas fazer com que o sistema cumpra os prazos estabelecidos, i.e. o sistema deve ter um fluxo produtivo suficientemente fiável para satisfazer a procura do mercado. Quanto maior for a variabilidade existente no sistema maiores *buffers* serão necessários (Levinson, 2007).

Corda: Esta analogia refere-se ao mecanismo de comunicação entre a restrição principal e a libertação de material para o sistema, e funciona de modo a garantir que o material é lançado a tempo, impedindo paragens na restrição, e simultaneamente assegurando que o material não é lançado a um ritmo mais rápido do que aquele a que a restrição o processa (Sproull, 2009). Representa o fluxo de informação, do “tambor” para o início do processo, que sincroniza a libertação de materiais para o sistema com a cadência da restrição (TOCICO, 2012).

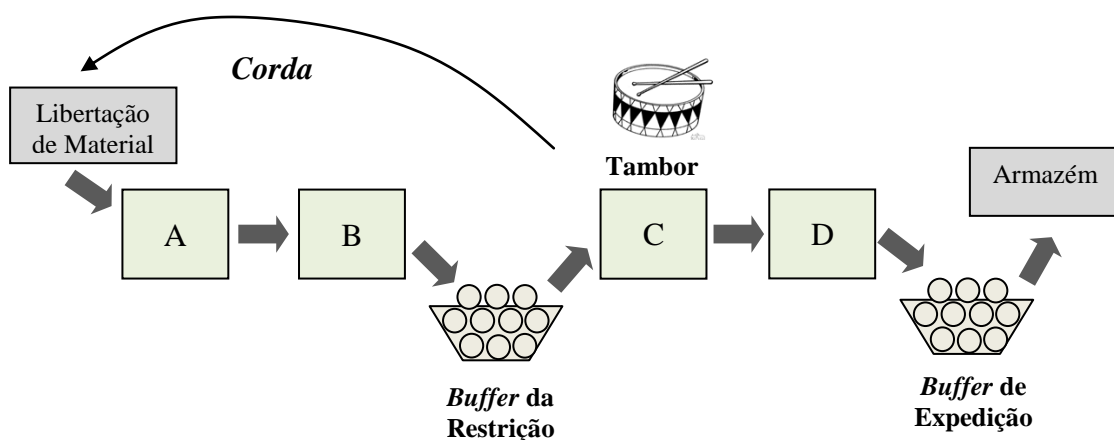


Figura 2.4: Ilustração do DBR (*Drum-Buffer-Rope*)

O DBR consiste num conjunto de regras para a implementação em fábrica dos primeiros três passos da TOC. A sua mais óbvia aplicação surge quando o desempenho de uma fábrica está limitada na capacidade de produção por um dos seus recursos, e todo o *T* da fábrica deve ser baseado na exploração e subordinação do sistema à restrição (Wu, Chen, Tsai, & Yang, 2010). Segundo Watson et al. (2007), esta ferramenta destina-se a abordar as restrições físicas e de mercado.

O processo de implementação começa com a identificação do “tambor”, em consonância com o primeiro passo do processo de melhoria contínua. Descoberto o recurso restritivo, e de modo a que este desempenhe ao máximo o seu papel de produzir *T* para a organização, é essencial explorá-lo (2º passo), assegurando que é plenamente utilizado. Uma das mais efetivas táticas para explorar o “tambor”, e aumentar o seu *output*, é desenvolver um plano detalhado para o seu funcionamento (e só o seu funcionamento) e respeitar essa programação/planeamento (Youngman, 2009). Conhecida a sua capacidade finita, e após a identificação da quantidade de peças, do *output* requerido, que necessitam de passar pelo “tambor”, é preparado um planeamento detalhado da execução de tarefas (sequência de ordens de produção) neste recurso tendo em conta os prazos de encomenda definidos. O desempenho do “tambor”, e consequentemente do sistema, resulta das decisões de explorar a restrição (Cox & Schleier, 2010; Wu et al., 2010).

O resultado deste passo, mantendo o *input* no sistema constante, é uma diminuição do nível de WIP e do *lead time* do processo, derivado do aumento do *output* da restrição e consequentemente do sistema. De seguida, são ajustados os restantes componentes do sistema ao “tambor”, em conformidade com o 3º passo. Numa primeira fase, e de modo a suportar a sua máxima eficiência, é introduzido o *buffer* da restrição, prevenindo este recurso da falta de material resultante da diminuição do WIP (Youngman, 2009).

Segundo Youngman (2009), existem duas regras a aplicar neste passo:

-A primeira diz respeito ao tamanho inicial do *buffer*, e consiste em reduzir para metade (50%) o *lead time* atual da organização na parte do sistema que se pretende proteger. Exemplificando, o tamanho inicial do *buffer* da restrição será metade do *lead time* atual entre o início da linha e a restrição. Também Cox e Schleier (2010) baseando-se numa vasta experiência, consideram um bom valor para o *buffer*, na maioria dos ambientes produtivos, metade do *lead time* existente.

-A segunda regra consiste em dividir o *buffer* em três zonas iguais, verde, amarela e vermelha (Fig. 2.5). O objetivo é que cada peça esteja pronta para ser processada pelo “tambor” após os primeiros dois terços do *buffer*. A zona vermelha representa o WIP mais próximo de ser utilizado pela restrição, uma falha ou penetração no *buffer* nesta zona, i.e. quando o material não está em frente à restrição no último terço do *buffer*, implica que a organização atue de forma a acelerar o processamento das peças em questão, de modo a que cheguem à restrição o mais rápido possível (Levinson, 2007). Porque pode

causar interrupções no “tambor”, uma falha nesta zona tem total prioridade, e caso necessário, são paradas quaisquer outras operações de modo a processar o material em falta (Bhardwaj et al., 2010).

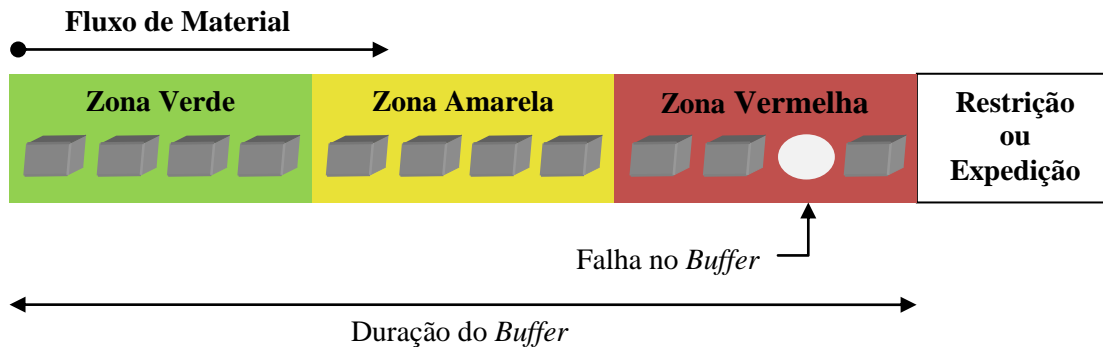


Figura 2.5: Buffers

Na segunda fase do ajustamento do sistema ao “tambor”, é introduzida o terceiro elemento do DBR, a corda, que assegura que o material entra no sistema ao mesmo ritmo/taxa a que o “tambor” o consome. O planeamento do abastecimento da linha de produção é igual ao planeamento do “tambor” desfasado da duração da corda (Youngman, 2009). Assim, a sua duração, é igual ao tamanho do *buffer* da restrição e determina a quantidade de existências entre o lançamento do material e o “tambor”.

Ao “amarrar” o “tambor” ao início da linha a organização certifica-se que o excesso de material não é admitido, e que, por outro lado, o material não entra no sistema demasiado cedo, protegendo o sistema do excesso de WIP e consequentemente de maiores *lead times* (Youngman, 2009). Ao invés de cada estação de trabalho ter um planeamento detalhado do trabalho a realizar, no DBR, cada estação só tem disponível material para executar a tarefa correta, eliminando o WIP desnecessário. Quando um recurso não-restritivo tem duas ordens de produção na fila de espera segue a regra FIFO (Cox & Schleier, 2010).

Após a restrição, o mecanismo funciona de forma semelhante. Em ambientes *make-to-order*, o “tambor” está ligado à procura do mercado através de uma segunda corda - corda de expedição (*shipping rope*) - e do respetivo *buffer* de expedição (*shipping buffer*). Estes elementos asseguram que todo o material processado pela restrição chegue no tempo previsto ao final do sistema. Na definição do *buffer* de expedição aplicam-se as mesmas regras que no *buffer* da restrição. O seu objetivo é proteger o cumprimento dos prazos de entrega ao cliente e melhorar o seu desempenho, traduzindo-se numa importante vantagem competitiva para a organização (Youngman, 2009).

A figura 2.6 resume os pontos críticos do DBR que devem ser cuidadosamente planeados (Cox & Schleier, 2010) e os seus três principais propósitos, que, segundo Sproull (2009) são consequência do seu planeamento:

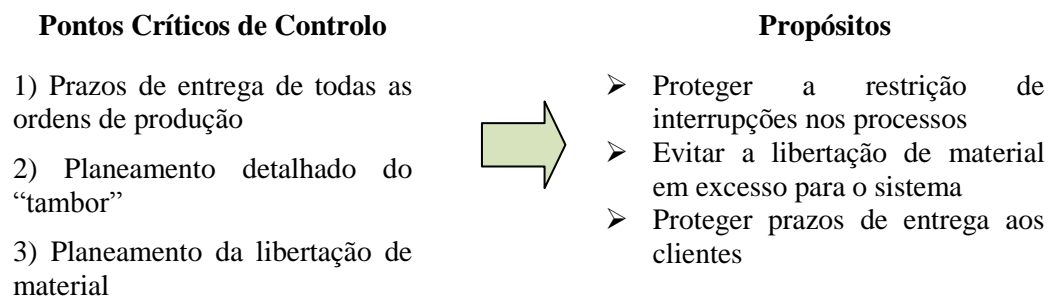


Figura 2.6: Planeamento e Objetivos do DBR

Buffer Management (Gestão das Reservas)

O mecanismo que monitoriza/controla o progresso do planeamento executado pelo DBR é denominado Gestão das Reservas (*Buffer Management* - BM), e é uma condição necessária ao seu eficaz funcionamento (Cox & Schleier, 2010).

Segundo Scharagenheim e Ronen (1991) em qualquer ambiente no qual o DBR esteja implementado o *Buffer Management* pode ser utilizado como ferramenta de diagnóstico e controlo. Com o calendário detalhado de tarefas da restrição, proveniente do DBR, conhece-se o instante em que a peça deve ser transformada pelo “tambor” e o tempo previsto de chegada ao mesmo. Ao invés de ser controlado, peça a peça, o seu tempo de chegada ao recurso, é mais simples verificar, com uma certa frequência, o teor de existências no *buffer* da restrição. Assinalando as partes em falta (falhas no *buffer*) consegue-se saber os desvios atuais do sistema em relação ao programado.

Com o BM pretende-se compreender e utilizar a informação fornecida pelos *buffers*. Este mecanismo filtra os sinais do dia-a-dia e alerta a organização para potenciais problemas, antes de os mesmos afetarem o funcionamento do sistema. Youngman (2009) distingue duas funções do BM:

- 1) Controlo Local: consiste no controlo efetuado diariamente para detetar as penetrações na zona vermelha do *buffer*.
- 2) Feedback Global: Tendências reveladas pelos *buffers* no longo prazo, sugerindo alterações no seu tamanho.

Num conjunto de 100 ordens de produção, Cox e Schleier Cox and Schleier (2010) estimam que pelo menos 10% do conjunto sofre mais do que as normais variações dos processos, que são absorvidas pelos *buffers*. Se não forem tomadas ações corretivas, esses 10% de ordens chegam à restrição ou ao final da linha depois do prazo estabelecido. De forma a tomar as necessárias ações corretivas antes de o WIP chegar ao seu destino, é calculado o *Buffer Status* (Estado das Reservas) (Equação 2.4) que fornece informação em tempo real de como está a decorrer o processamento de cada ordem de produção, independente da sua localização na fábrica:

$$Buffer\ Status\ (\%) = \frac{Tempo\ de\ Produção\ Disponível}{Duração\ do\ Buffer} \times 100 \quad (2.4)$$

O *buffer status* determina quando a organização deve concentrar a sua atenção em determinada ordem de produção, dando-lhe prioridade. Como geralmente o *buffer* é dividido em três zonas iguais (TOCICO, 2012), um *buffer status* entre 67% e 100% significa que a ordem está dentro da zona verde do *buffer* e no seu normal processo de fabrico sendo que nenhuma ação é tomada. Valores entre os 33% e 66% indicam que a ordem sofreu alguma variabilidade no processo e devem ser idealizados planos para acelerar a mesma, embora nenhuma ação seja tomada. Por último, quando resta menos de 1/3 do período de tempo estipulado para a ordem de produção chegar ao seu destino (*buffer status* inferior a 33% = falha no *buffer*), esta deve ser localizada e é acionado um plano de ação para que a penetração na zona vermelha do *buffer* não afete o *T* da organização, como anteriormente referido. Esta fórmula também pode ser utilizada para dar prioridade às ordens de produção numa fila de espera. Em vez do normal procedimento FIFO, pode ser utilizado o *buffer status* de cada ordem para priorizar a sequência de produção nos recursos não-restritivos (Cox & Schleier, 2010).

Para além do controlo local, o BM fornece um nível de feedback global do DBR, adquirido através da frequência de falhas no *buffer*, que segundo Youngman (2009) são a medida de estabilidade do sistema. As tendências evidenciadas pelas penetrações na zona vermelha funcionam como alerta para mudanças na dinâmica do sistema. Alteram-se ou afinam-se os parâmetros do DBR quando o comportamento do sistema assim o sugere.

Goldratt (1990) considera que uma normal frequência de falhas no *buffer* deve ser sensivelmente inferior a 10% do total de ordens de produção, ou seja, devem acontecer num número muito limitado de casos. A duração do *buffer* deve garantir que a maioria das falhas é corrigida a tempo. A probabilidade de um recurso ter de acelerar o processamento de várias partes para preencher as respetivas falhas nesta região deve ser reduzida (Schrageheim & Ronen, 1991).

Quando as falhas não se traduzem em problemas para a organização, a sua causa deve ser monitorizada e se possível retificada (Youngman, 2009). Contudo, se o número de falhas for considerado excessivo, significa que demasiadas ordens de produção estão a experimentar interrupções significativas relativamente ao tempo permitido para o seu processamento. Consequentemente, deve ser ajustada a dimensão do *buffer*, aumentando o *lead time* e o WIP permitidos no sistema. Por outro lado, um número muito reduzido de penetrações na zona vermelha é um claro indicador que a duração do *buffer* é maior do que a necessária, o que sugere uma oportunidade para reduzir o *lead time* planeado do DBR. Cox e Schleier (2010) referem que se a percentagem de penetrações na zona vermelha for superior a 15% de todas as ordens de produção a dimensão do *buffer* deve ser aumentada, ao passo que uma percentagem inferior a 5% aconselha uma redução da duração do *buffer*.

Se mesmo aumentando a duração do *buffer*, o material continuar em falta, é porque o problema que provoca as falhas é atualmente uma restrição. Determinar a duração ideal dos *buffers* reflete o balanceamento entre o *lead time* e a proteção dada às áreas chave da organização (Schrageheim & Ronen, 1991).

Eli Schrageheim e Ronen (1990) sintetizam em três pontos as vantagens do *Buffer Management*:

- Funciona como sistema de alarme utilizado para localizar problemas de urgente resolução que causam graves danos ao *T* do sistema;
- Controla o *lead time* da produção (a duração dos *buffers* determina o *lead time*);
- Através do número de falhas no *buffer*, identifica os centros de trabalho com pior *performance*, priorizando desta forma, os processos de melhoria a efetuar e avaliando posteriormente os *upgrades* introduzidos.

Simplified Drum-Buffer-Rope (S-DBR)

Após uma aplicação bem-sucedida da metodologia da TOC e do DBR, a normal consequência será a deslocação da restrição do sistema para o mercado. Neste caso, é necessário subordinar a restrição interna, o CCR, ao mercado, produzindo apenas o que a procura consegue absorver. Na presença desta situação, pode-se continuar a utilizar o DBR ou evoluir para o mais recente *Simplified Drum-Buffer-Rope* (S-DBR) (Youngman, 2009).

Se o CCR tem de estar subordinado ao mercado, o seu planeamento detalhado já não é necessário, pois este recurso já não dita o ritmo do sistema. Consequentemente, o *buffer* da restrição, utilizado para proteger o seu planeamento, também deixa de ser útil. O único *buffer* verdadeiramente indispensável é aquele cujo objetivo é proteger o compromisso com o mercado. O CCR deve no entanto ser monitorizado cuidadosamente, e a sequência de ordens de produção por ele processadas deve ser priorizada de acordo com o BM (Cox & Schleier, 2010).

O S-DBR sugere assim somente a utilização de um *buffer*, denominado *buffer* da produção (TOCICO, 2012), e uma corda cuja duração é igual a todo o *lead time* da produção. O lançamento do material para o sistema é sincronizado com a procura do mercado. Youngman (2009) indica que o *buffer* da restrição deixa de ser necessário quando o CCR trabalha a menos de 80% da sua capacidade.

Como o objetivo é fazer o produto chegar o mais rapidamente possível ao cliente, prescinde-se do *buffer* da restrição e do seu planeamento detalhado, pois esta passa a ter capacidade disponível para responder à variabilidade do sistema. Embora não seja utilizada a capacidade máxima de nenhum dos recursos, é isso que protege a fábrica de produzir um excesso de produtos que não consegue exportar (Ricketts, 2008).

2.1.5. Aplicação do DBR e *Buffer Management*

A introdução do DBR e BM traz duas melhorias notórias a uma organização. Em primeiro lugar, potencia e protege simultaneamente o T da restrição e consequentemente o T de todo o sistema. Em segundo lugar, limita a entrada de material no sistema produtivo, o que previne o excesso de WIP e se traduz numa redução do *lead time* da produção (Wu et al., 2010). A aplicação do BM em conjunto com o DBR amplia os resultados do uso exclusivo do DBR (Bhardwaj et al., 2010).

Qualquer paragem na restrição de um sistema é tempo perdido para sempre. Os *buffers* protegem a organização dos aleatórios e inevitáveis problemas que afetam o seu T , sendo assim, um mal necessário. Caso a fábrica tivesse um fluxo constante de material até à restrição, sem interrupções, os *buffers* não eram precisos, o que leva ao conceito de variação. A única forma de reduzir os *buffers* é reduzir as variações que os tornam necessários (Levinson, 2007).

Com as naturais alterações que existem numa organização, seja na procura, processos, produtos, ou recursos, a restrição do sistema não será sempre a mesma. O DBR deve ser reconfigurado sempre que mude a restrição. Através do *Buffer Management* o gestor dará rapidamente conta da alteração pois surgirão inúmeras falhas nos *buffers*. Se um dos processos a montante do atual “tambor” se tornar a nova restrição do sistema, várias ordens de produção vão penetrar na zona vermelha do *buffer* da restrição e de expedição. Caso o processo seja a jusante, apenas aparecerão falhas no *buffer* de expedição. O material em falta vai ser encontrado em frente à nova restrição (Bhardwaj et al., 2010).

Muitas organizações utilizaram os cinco passos TOC em conjunto com o DBR de forma a descobrir enormes quantidades de capacidade escondida nas suas fábricas (Corbett & Csillag, 2001; Mabin & Balderstone, 2000; Watson et al., 2007). Cada vez que a restrição principal é descoberta e explorada, aumenta o T e são removidas ações que não acrescentam valor. Estas atividades são removidas primeiro através da restrição e depois por todos os recursos e processos que afetam a restrição indiretamente (McMullen, 1998). Uma revisão da literatura realizada por Mabin e Balderstone (2000) através de 82 organizações, evidência não só melhorias no desempenho operacional e financeiro mas benefícios de uma magnitude maior:

- 70% Redução média no *lead time* (32 observações, com mais de 75% a reportarem um redução superior a 50%);
- 65% Redução média no tempo de ciclo (14 observações);
- 49% Redução média nas existências (32 observações);
- 63% Aumento médio das receitas (22 Observações, excluindo um *outlier* de +600% na Lucent Technologies e com 5 observações com aumentos superiores a 100%);
- 44% de melhoria média no desempenho dos prazos de entrega (amostra de 13 observações).

Também Corbett e Csillag (2001) estudaram os resultados da implementação do DBR em sete organizações. Segundo os autores, em média estas organizações tiveram um decréscimo de 43% do *lead time*, reduziram as existências (50,6%), melhoraram o cumprimento dos prazos de entrega (33,4%), aumentaram as receitas em 26,9% e a sua capacidade em 22,86%. Apesar das bem-sucedidas implementações deste mecanismo de gestão das operações nos sistemas produtivos, a sua conceção e detalhe devem ser adequadas às especificidades e características únicas de cada organização (Wu et al., 2010). Gupta et al. (2010) indica três fatores para introduzir o DBR com sucesso:

- 1) É extremamente importante os principais gestores estarem ativamente envolvidos em todo o processo.
- 2) Vale a pena despende uma parte significativa do tempo a desenvolver regras de planeamento realísticas para o “tambor”, com o uso de simulação.
- 3) Durante o período de transição, podem ser necessárias mudanças na gestão.

2.2. Comparação da TOC com Lean e Seis Sigma

A Teoria das Restrições não é a única metodologia aplicada na gestão dos sistemas produtivos. Com a evolução das necessidades das organizações, diversas metodologias de melhoria contínua foram surgindo, contendo entre si substanciais diferenças e similaridades. Uma metodologia é definida como um conjunto estruturado de orientações, ou atividades, que auxiliam as pessoas na realização de pesquisas ou intervenções. Cada metodologia pode ser decomposta posteriormente num conjunto de técnicas. Por sua vez, a técnica é uma atividade específica com um propósito claro e bem definido (Stamm, Neitzert, & Singh, 2009). Neste subcapítulo serão comparadas três das mais populares metodologias aplicadas à produção, o Lean, Seis Sigma e TOC.

2.2.1. *Lean Manufacturing*

Lean Manufacturing é uma abordagem ao nível do sistema, focada na identificação e eliminação de todas as atividades que não acrescentem valor a um processo. Pretende envolver todos os elementos de uma organização em busca da eliminação de toda e qualquer forma de desperdício. Uma organização ganha vantagem competitiva assegurando que todas as tarefas se concentram na rápida transformação da matéria-prima em produto final. O seu objetivo é usar menor esforço humano, menos existências, menos espaço e menos tempo para fabricar produtos de alta qualidade tão eficientemente e economicamente quanto possível, tendo alta capacidade de resposta às necessidades dos clientes e à procura (Sproull, 2009).

As ideias do *Lean Manufacturing* baseiam-se no conhecido *Toyota Production System* (TPS). Os seus dois pilares, definidos por Ohno (1988) são o JIT, que se refere ao estado ideal de fluxo de um sistema, i.e. as peças chegam ao local adequado no momento exato e na quantidade certa, e o *jidoka* que representa a habilidade das máquinas pararem imediatamente logo que um processo não satisfaça as especificações. Neste sistema as pessoas exercem um papel fundamental na melhoria do seu desempenho, engenheiros, gestores e operadores são envolvidos nos processos de melhoria contínua da organização utilizando as ferramentas e soluções fornecidos pelo TPS. Entre as técnicas que ajudaram a desenvolver o *Lean Manufacturing* estão o JIT, *kaizen*, *one-piece-flow*, *jidoka* e *heijunka* (Ramos, 2010).

O objetivo do Lean consiste na eliminação de desperdícios em todas as áreas de negócio e a sua produção alicerça-se na ideia de *kaizen* ou de melhoria contínua. Estas atividades de *kaizen* focam-se na eliminação de desperdícios, aumento da produtividade e na melhoria contínua dos processos chave na organização. Esta filosofia provoca que pequenas mas contínuas melhorias resultem em substanciais melhorias para o sistema (Ramos, 2010).

Taichi Ohno (1988) identificou e classificou sete tipos de desperdício que podem ocorrer num sistema e que aumentam o tempo entre a ordem de produção e a venda do produto final:

1. Excesso de produção: Produzir mais do que a procura.
2. Espera: Tempo em que não está a ser acrescentado valor ao produto. Altos níveis de existências, pessoal, peças ou informação podem levar a elevados tempos de espera.
3. Transportes: Todo o tipo de transporte de material desnecessário. O movimento não acrescenta valor ao produto.
4. Existências: Matéria-prima, trabalho em processamento ou produto final em quantidades maiores que as necessárias.
5. Movimentos: Movimento de pessoas não necessários, que não criam valor e podem levar a problemas de saúde ou segurança. Uma má organização ou o *design* do local de trabalho pode levar a este desperdício.
6. Processamento incorreto ou extraordinário: Adicionar processos que não trazem valor ao cliente, o que inclui trabalho duplicado ou extra inspeções numa tentativa de melhorar o produto, quando o cliente não requiere esse “toque extra”.
7. Defeitos: Produção de peças defeituosas ou que necessitam de ser reparadas. Problemas no equipamento, processos incorretos, ou falta de controlo conduzem a defeitos na produção.

Recentemente foi adicionada uma oitava categoria, denominada criatividade, que diz respeito ao desperdício em não usar a criatividade dos operadores, a sua capacidade cerebral e experiencia (Sproull, 2009).

Os cinco princípios do processo de implementação da metodologia Lean foram posteriormente descritos por Womack e Jones (2003):

1. Identificar valor: A determinação dos componentes que criam valor no produto é realizada na perspectiva do cliente externo e interno. O valor é expresso em termos de como um produto preenche as necessidades dos clientes, a um preço específico e num determinado período de tempo.
2. Identificar a sequência de atividades denominada cadeia de valor: Todas as ações requeridas desde a concepção à entrega do produto ao cliente. Segundo Womack e Jones existem três tipos de operações na cadeia de valor: ações de valor acrescentado, ações que não acrescentam valor mas são necessárias, e ações que não imputam nenhum valor e devem ser imediatamente eliminadas.
3. Implementar o fluxo contínuo: Eliminadas as ações que não acrescentam valor, o objetivo é manter o fluxo produtivo de modo a maximizar o valor, produzindo apenas o que é necessário, no menor tempo e com os mínimos recursos possíveis. Fluxo é o movimento ininterrupto de um produto/serviço através do sistema até ao cliente. Os seus maiores inibidores são as filas de espera, o transporte e o processamento em lotes. Ao se atrasar o processamento do produto retarda-se a aplicação de dinheiro nas restrições ou outras atividade de desperdício.
4. Permitir que o cliente puxe o produto/serviço: Produzir de acordo com a taxa de encomendas e nada mais.
5. Procurar a perfeição: Capacitar os operadores de ferramentas para eliminar o desperdício, melhorar o fluxo e a satisfação do cliente. Criar uma cultura de melhoria contínua.

O foco dos métodos Lean na eliminação das atividades que não acrescentam valor e na melhoria do fluxo produtivo tem efeitos secundários no sistema além do acréscimo de qualidade (Nave, 2002). O tempo de processamento é menor, tal como as hipóteses de ocorrência de danos ou obsolescência. A variabilidade dos processos também diminui com a simplificação dos mesmos. Percorrendo todas as atividades da cadeia de valor, as restrições do sistema vão sendo removidas. Segundo Nave (2002), esta metodologia tem assim os seguintes pressupostos:

- Pessoas valorizam os efeitos visuais no fluxo.
- A maior restrição à rentabilidade dos sistemas são os desperdícios.
- Uma rápida sucessão de pequenas melhorias é mais benéfica que um estudo analítico.
- Os efeitos da interação entre os processos são resolvidos através do aperfeiçoamento da cadeia de valor. Por oposição à TOC, o sistema não é visto como um conjunto de processos interdependentes.

2.2.2. Seis Sigma

Com origem na Motorola Corporation, o Seis Sigma defende que a origem dos problemas que afetam um sistema está na variabilidade do processo e da qualidade do produto. O seu objetivo é que num milhão de oportunidades não surjam mais de 3,4 defeitos, correspondendo os defeitos a qualquer aspeto que diga respeito à satisfação dos clientes.

As aleatórias variações que ocorrem nos processos conduzem a operações mais ineficientes, que por seu turno, podem resultar em produtos com menor qualidade e na insatisfação do cliente. Um sistema estável e previsível permite elevar os rendimentos, melhorar a previsão, e entregar ao cliente um produto com maior qualidade (Sproull, 2009).

Schroeder et. al (Schroeder, Linderman, Liedtke, & Choo, 2008) definem o Seis Sigma (6S) como uma “meso-estrutura paralela, organizada para reduzir a variação nos processos das organizações, através do uso de especialistas certificados (*Master Black Belts*, *Black Belts* e *Green Belts*), um método estruturado (DMAIC), e medidas de desempenho com o intuito de atingir objetivos estratégicos”. O 6S opera de um modo paralelo ao normal funcionamento da organização, dedicando-se a melhorar o seu desempenho. Na sua estrutura hierárquica, os líderes (*Champions*) iniciam, suportam e revêm os principais projetos de melhoria, os *Black Belts* lideram os projetos e tutelam os *Green Belts*, em busca das respostas aos problemas. A conexão entre os diferentes níveis organizacionais é considerada muito importante.

A implementação do 6S envolve um método estruturado composto por cinco passos - conhecidos como DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*) – que emprega várias ferramentas padrão da qualidade para determinar a raiz dos problemas (Schroeder et al., 2008) e que foram concebidos para facilitar o processo de melhoria contínua (Ehie, 2005; Nave, 2002):

- (1) Definir: Descrever o processo, os clientes e os seus problemas. Identificar as características principais do produto do ponto de vista do cliente e quais os processos que as suportam.
- (2) Medir: Categorizar as principais características dos processo, verificar sistemas de medição e recolher dados.
- (3) Analisar: Usar os dados recolhidos para determinar e compreender as variáveis que originam a variação da qualidade.
- (4) Melhorar: Identificar meios e desenvolver soluções para remover as causas dos defeitos e modificar os processos. O resultado das mudanças é verificado nas medições.
- (5) Controlar: Se o processo se encontra ao nível desejado e previsto, é controlado através de uma monitorização para assegurar que não ocorrem alterações imprevistas.

Segundo Ehie (2005), o principal objetivo dos cinco passos consiste em reconhecer os requisitos críticos do ponto de vista dos clientes, identificar e validar as oportunidades de melhoria e, em

sequência, aprimorar os processos. Uma das poderosas mensagens que o 6S transmite é que sem efetuar medições não se consegue melhorar. Suposições apoiadas na experiência podem ser efetuadas, mas sem dados concretos, as conclusões são baseadas numa evidência insuficiente. Primeiro é necessário questionar, procurar as respostas, e de seguida fazer medições em busca das mesmas. O que separa o 6S das outras metodologias de melhoria contínua é o uso de ferramentas e técnicas de análise estatística para traduzir os dados recolhidos em informação que ajude a tomada de decisão (Sproull, 2009).

Embora a filosofia e ferramentas subjacentes ao Seis Sigma serem muito similares a abordagens anteriormente realizadas na área da gestão da qualidade (ex. TQM), este fornece uma nova estrutura organizacional em torno da implementação de melhorias. Esta estrutura introduz nas organizações melhores e mais rigorosos processos de controlo e simultaneamente cria um contexto que permite a exploração de novos problemas. Muito devido à sua abordagem disciplinada, o Seis Sigma tem sido atrativo para muitos CEO e executivos, oferecendo verificados retornos financeiros, como é o caso da *General Electrics* (Schroeder et al., 2008). Um grande número de organizações tais como a *Sony*, *Texas Instruments*, entre outras, potenciou a sua rentabilidade, aumentou a cota de mercado e a satisfação do cliente através da implementação desta metodologia (Ehie, 2005).

O facto de se concentrarem os esforços na redução da variabilidade produz efeitos secundários. Durante a investigação dos processos há uma reavaliação das atividades que acrescentam valor ao produto, algumas ações são modificadas e melhoradas, e outras eliminadas. É reduzida a probabilidade de ocorrência de erros. Ao serem descobertos, durante os projetos, os elementos que restringem o fluxo produtivo ao longo do sistema, e à medida que os processos sofrem melhorias, a consequência é ter menor variabilidade no processo, mais qualidade, menos inventários, um aumento do volume de *outputs* e uma melhor resposta às necessidades dos clientes (Nave, 2002).

Segundo Nave (2002) o 6S baseia-se em dois pressupostos:

- 1) Um conhecimento profundo e uma análise dos dados retirados do sistema podem ser usados para produzir melhorias e fornecer novas e diferentes perspetivas de todo o processo. Os elementos das organizações compreendem e apreciam o facto de “números” poderem ser transformados em características do processo.
- 2) Uma redução na variação de todos os processos significa uma melhoria dos resultados ao nível do processo global.

Um dos fundamentos desta metodologia são os níveis sigma, que nos indicam o nível de qualidade de um produto, através de uma medição dos processos baseada nos produtos defeituosos. A unidade de medição são os defeitos por milhão de oportunidades (DPMO). Uma mudança para um nível superior representa uma melhoria na qualidade do produto e uma redução de custos de produção, uma subida nas vendas e consequentemente, na rentabilidade da organização. No entanto, para Bob Sproull

(2009), este positivo impacto só acontece se os esforços de melhoria se concentrarem na restrição do sistema.

2.2.3. Comparação entre as Metodologias: TOC, Lean e Seis Sigma

No mundo global onde vivemos, a competição continua a crescer e a pressão exercida sobre as organizações intensifica-se a cada dia que passa. Para sobreviver, as empresas esforçam-se em satisfazer o cliente recorrendo frequentemente a processos de melhoria contínua. Embora existam diversas formas de melhorar, muitas organizações têm investido em pelo menos uma das três metodologias de melhoria mais populares: Teoria das Restrições, Seis Sigma e Lean (Goldratt Institute, 2009). Os gestores tendem a aplicar o método em que se sintam mais confortáveis ou que evidencie mais resultados (Pirasteh & Farah, 2006).

Existem bastantes sinergias entre as metodologias pois todas estão voltadas para o consumidor, procurando proporcionar-lhe o melhor valor possível (Goldratt Institute, 2009). Ao longo da sua aplicação as organizações pretendem atingir vantagens competitivas semelhantes, tais como a redução de existências, eliminação de desperdícios, rapidez do fluxo ou aumento da qualidade. Através de uma consulta aos textos de Nave (2002) e Sproull (2009), é possível sintetizar as suas principais ideias e resultados na tabela 2.1.

Para além das sinergias, as três metodologias contêm divergências que devem ser analisadas cuidadosamente. A primeira diferença diz respeito à sua perspetiva inicial, ou seja, ao seu principal foco e resultados a atingir, como salienta Nave (2002), os diferentes focos resultam em diferentes áreas de melhoria:

- Seis Sigma: Se o foco incidir na redução da variabilidade, então o *output* dos processos será mais uniforme.
- Lean: Se o foco incidir na remoção dos desperdícios, melhora-se o tempo de ciclo.
- TOC: Se o foco incidir nas restrições, aumenta-se a capacidade do sistema.

O 6S e o Lean ao promoverem melhorias e soluções para reduzir as despesas operacionais e existências estão limitadas no seu alcance, já que as duas medidas de desempenho têm limite inferior (no limite o *stock* de um sistema é zero) ao contrário das receitas, o foco da TOC, que não tem limite superior, pode crescer infinitamente. Mesmo que a procura supere a restrição do sistema, tem-se uma nova restrição, o mercado, que pode ser quebrada através de vantagens competitivas como a redução do *lead time* (Sproull, 2009).

Tabela 2.1: Comparação entre TOC, *Lean* e Seis Sigma

	TOC	Lean	Seis Sigma
Teoria	Gestão das restrições	Eliminar desperdícios	Redução da variação e defeitos
Guia de Aplicação	1. Identificar a restrição 2. Explorar a restrição 3. Subordinar o sistema à restrição 4. Elevar a restrição 5. Voltar ao primeiro passo	1. Definir valor 2. Identificar a cadeia de valor 3. Fluxo contínuo 4. Produção pull 5. Atingir a perfeição	1. Definir necessidades e projetos 2. Medir <i>performance</i> 3. Analisar as origens das causas 4. Aperfeiçoar o processo 5. Controlar e manter as melhorias
Foco	Otimização do sistema	Melhorar fluxo	Definir e solucionar problemas
Objetivo Primário	Definir o correto foco do sistema	Processos simplificados	Fiabilidade e previsibilidade
Efeito Primário	Aumento da capacidade	Menos desperdícios e ciclos mais curtos	<i>Output</i> uniforme
Impacto Financeiro	Aumento das receitas	Redução das existências e despesas operacionais	Redução das despesas operacionais
Efeitos Secundários	-Redução de desperdícios e existências - <i>Throughput Accounting</i> - Melhoria da qualidade	-Redução variabilidade - <i>Output</i> uniforme - Reduz existências - Novo sistema de contabilidade - Melhoria da qualidade	-Menos desperdício - Eleva taxa de <i>T</i> - Reduz existências - Reduz flutuações nos processos - Melhoria da qualidade
Críticas	- Minimiza o <i>input</i> dos operadores - Não valoriza a análise de dados	- Não valoriza a análise estatística nem vê o sistema como um todo	- Ignora interações do sistema - Processos melhorados de forma independente

Embora com diferentes perspectivas iniciais, Nave (2002) faz notar que os efeitos secundários das metodologias tendem para conceitos comuns e que alguns dos efeitos secundários de umas são similares aos efeitos primários das outras. Na comparação que efetua conclui que as metodologias caminham no mesmo sentido no longo prazo, sugerindo a escolha, daquela que melhor se encaixe na cultura e nos valores da organização. Assim, quando as organizações favorecem o estudo e análise de dados o Seis Sigma é o método indicado. Por outro lado, o Lean é perfeito para organizações que valorizem a mudança visual no momento. A TOC é adequada para organizações que vejam um sistema como um todo, que possuam uma estrutura hierárquica e poder centralizado. Ao contrário do Lean, os operadores não necessitam de ter um conhecimento profundo da metodologia. O mais importante é selecionar o método capaz de dar à organização os resultados desejados.

Apesar de concluir que as metodologias caminham no mesmo sentido, Nave (2002) não abordou a sua integração. Tal como vários outros autores, o pensamento centrou-se em procurar escolher a melhor metodologia. Mais recentemente surgiram vários estudos (Goldratt Institute, 2009; Kasemset, 2011;

Pirasteh & Farah, 2006; Sproull, 2009; Woeppel, 2009) sobre a integração das três iniciativas de melhoria, principalmente devido ao recorrente falhanço de iniciativas deste tipo (Sproull, 2009).

Atualmente múltiplas empresas, independentemente do seu sector ou dimensão, estão a introduzir métodos de melhoria contínua, perseguindo os seus benefícios e procurando ganhar vantagem competitiva. Segundo Woeppel (2009), apesar da generalizada aplicação destes conceitos, os maus resultados persistem. Um questionário mencionado por este autor, realizado em 2007 pela *Industry Week Magazine*, indicava que somente 25% dos fabricantes inquiridos estão a progredir significativamente com a utilização destes métodos. 70% desses fabricantes usavam ferramentas Lean, 29% Seis Sigma e apenas 14% tinham a TOC como metodologia. Também relevante é o facto de a maioria das empresas comunicar apenas alguns avanços. Repetidamente as expectativas não são alcançadas.

Embora seja reconhecida como uma das mais eficazes estratégias de melhoria no mundo empresarial, muitas das iniciativas Lean estão estagnadas ou sem resultados, apesar do esforço financeiro gasto na introdução de melhorias (Sproull, 2009). Em 2008, através do questionário anual conduzido pelo *Lean Enterprise Institute*, 32,1% das organizações indicavam que o seu maior problema na implementação da estratégia era um retrocesso aos antigos métodos de trabalho, em 2004 e 2005 essa percentagem praticamente atingia os 50% (Lean Enterprise Institute, 2008). Também *Jason Premo* citado por Sproull (2009) indica um estudo com resultados desoladores, em que apenas 5% das empresas estão a atingir os resultados esperados, enquanto mais de 40% atingiram um ponto de estagnação ou estão mesmo a regredir.

Após testemunhar várias aplicações de metodologias Lean, Seis Sigma, Lean-Seis Sigma (LSS) ou TOC, Sproull (2009) enumera duas causas principais para o insucesso destas iniciativas:

- 1) Falha em reconhecer o foco: o âmbito ou dimensão da iniciativa supera a capacidade dos recursos disponíveis, exige mais capacidade que a disponível.
- 2) Falha em reconhecer os pontos de alavanca (*leverage points*), ou seja, falha em identificar os elementos da estrutura onde uma alteração pode produzir maior impacto no comportamento do sistema.

Para este autor os falhanços do Lean e do Seis Sigma estão essencialmente ligados primeiro ponto. A maioria das organizações procura implementar melhorias ao longo de todos os processos, ou eliminar desperdícios em toda a cadeia de valor e os gestores ficam desiludidos pois isso não é traduzido em melhorias substanciais no objetivo.

A soma das otimizações locais não se traduz na otimização global do sistema. Este pressuposto subjacente à TOC é, segundo Nave (2002), uma das críticas mais comuns feitas ao Lean e 6S que defendem que uma melhoria e aperfeiçoamento de cada processo, realizado independentemente de modo a maximizar os *outputs*, resultam numa melhoria de todo o sistema.

Isso pode ser verificado através do segundo pressuposto do 6S (Cap. 2.2.2). Analisar (e melhorar) individualmente cada processo da organização implica gastar demasiados esforços que poderão não ser compensados. Se esses esforços influenciarem a capacidade da organização em satisfazer as necessidades dos clientes, podem ter um efeito prejudicial e as poupanças atingidas serem inferiores ao custo das melhorias efetuadas. A organização pode estar a evoluir no sentido contrário ao seu propósito (Nave, 2002). Embora a análise estatística seja essencial, é necessário não a usar em demasia, em detrimento de outros processos de melhoria. Muitas organizações passam demasiado tempo a recolher e analisar os dados retirados, têm excesso de informação e uma paralisia na sua análise conduz a uma falha em transforma-los em soluções (Sproull, 2009).

Por seu lado Woeppel (2009) refere que a maioria das metodologias de melhoria não atinge os resultados esperados, por serem quase exclusivamente centradas na redução dos tempos de processamento, caindo na armadilha de acreditarem que reduzir o tempo de processo em uma hora resulta na redução dos custos no mesmo valor e que isso se traduzirá nos resultados finais, o que raramente acontece. As equipas de melhoria tendem a tentar melhorar o processo que consome mais tempo, que tem maiores tempos de preparação ou com maior taxa de falhas. O erro está na escolha do processo a melhorar, apenas os projetos focados nos pontos de alavanca tem um retorno significativo. Se o elo mais fraco da cadeia determina a sua força, as equipas de melhoria devem focar-se nesse ponto ao invés de evoluir as ligações que não afetam a força da cadeia. O processo de melhoria deve demonstrar resultados mesuráveis, e que financeiramente justifiquem os esforços realizados.

A TOC supera estas críticas defendendo que o desempenho global do sistema é limitado por um número reduzido de variáveis em cada momento. Ao focar-se na restrição, não requer nem um elevado número de recursos gastos a compreender cada elemento do sistema, nem conhecimentos avançados em análise de dados. Os esforços serão assim realizados com um envolvimento mínimo da força de trabalho (Nave, 2002).

2.2.4. A TOC e o Lean aplicado ao Balanceamento de Linhas de Produção

O fluxo de materiais num sistema pode ser controlado por dois tipos de mecanismos de produção, o mecanismo *push* caracterizado por empurrar a produção, e o mecanismo *pull*, caracterizado por puxar a produção.

Nos sistemas *push*, como o MRP, o material é empurrado de operação em operação até chegar ao armazém. Cada processo gere a sua produção através de uma programação própria, sendo os materiais processados tão rápido quanto o permitido pelos recursos. Nestes sistemas, o material entra no sistema com base na procura atual e na previsão de encomendas, não tendo em conta a capacidade disponível do sistema em cada momento, o que resulta num considerável aumento de existências além de uma redução na resposta da organização ao mercado e a novas encomendas (Levinson, 2007).

Devido ao avanço tecnológico e atendendo à concorrência global dos dias de hoje, os sistemas de produção *push* tradicionais foram substituídos pelos sistemas *pull*, nos quais o WIP é controlado/gerido com maior precisão (Wang, Cao, & Kong, 2009). Também Levinson (2007) refere que os sistemas *pull* têm em relação aos primeiros, vantagens inerentes.

Hopp e Spearman (2001) diferenciam os sistemas pelo seu mecanismo de abastecimento da produção. Na sua definição, um sistema *push* programa a libertação de material para o processo baseado na procura ou na previsão de encomendas, ao passo que um sistema *pull* baseia-se no estado atual do sistema, a ordem vem de dentro do sistema. Os sistemas *pull* apenas permitem a entrada de material na produção (fábrica, linha, ou estação de trabalho), quando é gerado um sinal que simboliza uma modificação no estado atual do sistema. Segundo estes autores, a sua real vantagem é o facto de limitarem a quantidade de WIP no sistema, independentemente do que acontecer, o nível de WIP não pode ultrapassar um limite pré-estabelecido.

Para Ricketts (2008), mudar as organizações dos sistemas *push* para *pull*, é um elemento chave em todas as aplicações da Teoria das Restrições. Nada é produzido a menos que exista para mercado para tal. O mercado puxa pela restrição interna enquanto se otimiza a produção e simultaneamente se reduzem as existências.

Tanto a TOC como o Lean defendem sistemas *pull* baseados na resposta ao mercado, procurando aumentar o fluxo entre processos e reduzir o *lead time* para o mercado. No entanto existem divergências assinaláveis na configuração que propõem para as suas linhas de produção. Hopp e Spearman (2001) distinguem dois tipos de linhas:

Flow Lines: São linhas passíveis de ser controladas por sistemas de produção *pull*, como o DBR ou Kanban. Cada estação de trabalho opera ao seu próprio ritmo e tem a sua própria taxa de *output*. O ritmo geral do sistema é ditado pela restrição ou pelo recurso com menor capacidade. De seguida, o sistema DBR ou Kanban controla a velocidade das estações de trabalho mais rápidas, impedindo-as de ultrapassar o passo da restrição.

Paced Lines: Este tipo de linha inclui as tradicionais linhas de montagem nas quais um sistema de transporte (ex. tapete rolante) dita a velocidade do sistema, transportando as peças de uma estação para a seguinte. É configurada de modo a que os operadores de cada estação tenham tempo suficiente para acabar o seu trabalho na sua estação. O seu correto funcionamento requer assim um balanceamento

das operações, de modo a que cada estação tenha aproximadamente a mesma carga de trabalho. A principal restrição nestas linhas não é a estação mais lenta mas o próprio mecanismo de transporte. O ritmo do sistema é definido pelo *Takt Time* (TT), que é o rácio entre o tempo disponível de produção e a procura (taxa a que se deve produzir para satisfazer a procura do mercado).

O balanceamento de uma linha consiste na alocação de tarefas a estações de trabalho, de modo a respeitar as relações de precedências, e a que cada estação utilize aproximadamente o mesmo tempo para realizar as tarefas a ela alocadas (A. Pereira, 2010). Os seus benefícios gerais são o aumento de eficiências e taxas na utilização de recursos, e a redução de injustiças na carga de trabalho de cada operador.

Tal como Hopp e Spearman (2001), Cheng (2002) defende que o balanceamento de linha, embora funcione bem nas *Paced Lines*, não é apropriado às *Flow Lines*. A razão prende-se com a combinação de eventos dependentes com as flutuações estatísticas que habita neste tipo de linhas, como referido no Cap. 2.1.1. As medidas de desempenho de cada estação de trabalho como o WIP, tempo de ciclo e taxa de *output*, são consideravelmente influenciadas pela *performance* das estações que as antecedem e pela variabilidade existente no processo.

Segundo esta definição tanto a abordagem TOC como Lean aplicam *Flow Lines* nos seus sistemas, diferindo no entanto, no modo como gerem a capacidade das suas linhas de produção, como é visível na figura 2.7.

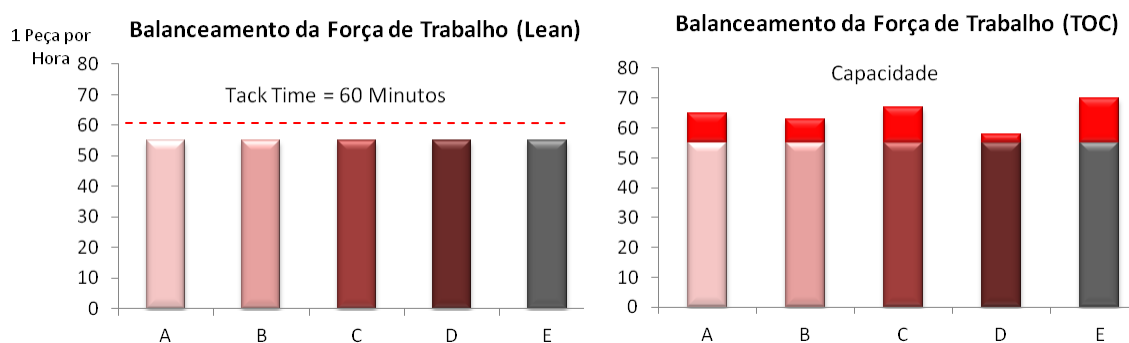


Figura 2.7: Comparação entre o balanceamento dos operadores no *Lean* e TOC

Adaptado de Goldratt Institute (2009)

Na abordagem Lean ao balanceamento de linha, a força de trabalho deve ser distribuída de modo a que o tempo requerido por cada operador para realizar a sua tarefa seja ligeiramente inferior ao *Takt Time* (TT) definido (Sproull, 2009), como demonstra o primeiro gráfico da figura 2.7. Em cada operação, toda a capacidade que exceda a necessária para satisfazer a procura do mercado, é considerada desperdício, e as equipas de melhoria procuram reduzir esse desperdício. A busca por altos níveis de utilização leva a que qualquer operação do sistema se possa tornar na sua restrição principal, caso surjam elevadas variações na procura, produto ou processos.

Nestas linhas balanceadas, um incremento no tempo de processamento de uma operação, devido a algum atraso ou avaria, provoca o aumento do TT de todo o sistema. Pelo contrário, uma redução no tempo faz com que o recurso não tenha incentivo (pressa) em acabar o trabalho, anulando o efeito positivo que poderia ter. Este é o resultado de ter proteção isolada dentro de cada operação (Goldratt Institute, 2009).

Como referido no capítulo 2.1.4, na TOC, os recursos não-restritivos mantêm uma capacidade extra (representada na figura 2.7 a vermelho) que previne que a variabilidade do sistema afete a restrição. Neste tipo de linha, a utilização ou eficiência são métricas importantes apenas no recurso limitante, enquanto os restantes recursos são medidos consoante a sua eficácia a abastecer os *buffers* através do *Buffer Management*. Uma das consequências da sua aplicação é que alguns recursos não restritivos são, por vezes, forçados a trabalhar aquém da sua capacidade máxima, e ficam desocupados ou parados, o que do ponto de vista Lean é uma atividade que não acrescenta valor e um desperdício a eliminar. Contudo, a busca da máxima eficiência em todos os recursos pode ser um fator chave para o falhanço da introdução de melhorias (Sproull, 2009).

Nas linhas não balanceadas, quando o operador fica bloqueado, ele deve trabalhar na próxima sequência de trabalho até o problema ficar resolvido. As peças acabadas antes do previsto são transportadas para a próxima operação e são agregadas nos *buffers* temporais que protegem a restrição, ou a entrega do produto ao cliente, das naturais variações nos tempos de processo e na procura (Goldratt Institute, 2009). Um dos benefícios do balanceamento, a distribuição da carga de trabalho, pode ser tratado com uma comunicação adequada, assegurada pela gestão (Cheng, 2002). Um erro apontado por Sproull (2009) às organizações é a redução de custos operacionais nos processos com extra capacidade recorrendo a dispensas de operadores. Embora com ganhos no curto prazo, esta é a melhor forma de desmotivar a força de trabalho.

Muitas organizações gostariam de aumentar a utilização e eficiência de um recurso, como uma máquina, e ao mesmo tempo aplicar a Teoria da Restrições, o que é impraticável. Como já foi referido (Cap. 2.1.1), a TOC demonstra que a procura por elevados níveis de eficiência encaminha frequentemente a organização na direção oposta ao seu propósito (Cheng, 2002).

Por outro lado, Hopp e Spearman (2001) mostram através de uma análise matemática os efeitos negativos de aumentar a utilização de um recurso não-restritivo, concluindo que existe uma degradação do tempo de ciclo, qualidade e serviços, dependendo do nível de variabilidade da fábrica. Estes autores, contrariando o ênfase dado pelos engenheiros industriais ao balanceamento de linha, recomendam um desequilíbrio da carga de trabalho para as *Flow Lines*, de modo a aumentar o seu desempenho.

Diferenças no Abastecimento da Linha

Outra diferença entre as metodologias é o método de sinalizar a entrada de material para a linha. Sendo sistemas *pull*, assentes na resposta ao mercado, enquanto a TOC se baseia em tempo (DBR - através dos *buffers*) o Lean baseia-se na quantidade de inventário (tipo de sistema Kanban) como se demonstra na figura 2.8 (Goldratt Institute, 2009).

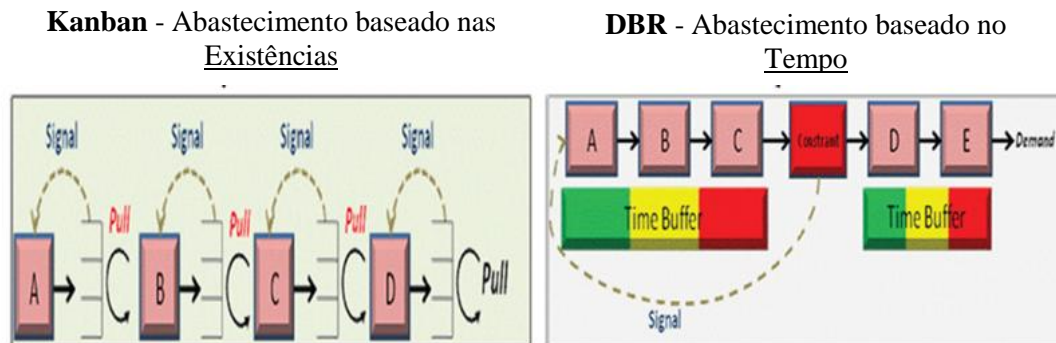


Figura 2.8: Diferenças entre o sistema Kanban e o DBR no abastecimento da linha

Adaptado de Goldratt Institute (2009)

O sistema Kanban consiste no envio de instruções, das operações a jusante para operações a montante, realizadas após um sinal, geralmente em forma de um pequeno cartão denominado Kanban, puxando o trabalho ao longo de toda a linha. Este procedimento é contínuo até os supermercados, presentes em cada processo, serem abastecidos, ou seja, atingirem o seu nível padrão. Nada é produzido sem existir um sinal para tal.

No DBR, após a programação da restrição correspondente a uma nova ordem de produção, é enviado um sinal, da restrição para o início da linha (corda), com informação do tempo para o material entrar na linha. Como o WIP é baseado na necessidade do mercado e na capacidade da restrição, não existe um número *standard* de unidades de WIP no sistema. Neste mecanismo, as grandes variações na procura, produtos e processos são absorvidas pelos *buffers* mantidos nos pontos críticos do sistema. Ao invés do sistema Kanban, que protege individualmente cada operação da variabilidade presente no sistema, o DBR só protege os locais considerados estratégicos (os restantes recursos estão protegidos pela sua capacidade extra), proporcionando assim um maior grau de fiabilidade, que se pode traduzir numa significativa redução do *lead time* (Cox & Schleier, 2010).

Levinson (2007) aponta como vantagem do DBR a sua maior simplicidade, pois enquanto o sistema Kanban exige uma comunicação entre todas as operações adjacentes, o DBR só utiliza a informação fornecida pela corda. O mesmo autor também sugere que o DBR é vantajoso em relação ao Kanban quando o sistema tem uma restrição. A regra em que se baseia o Kanban é atuar apenas em resposta a um compartimento vazio ou sinal semelhante. Se a operação que sucede à restrição parar a sua produção por qualquer motivo, e não enviar mais Kanbans, a restrição fica bloqueada sendo obrigada a

parar. A TOC evita este problema ligando a restrição ao início da produção, aproveitando assim todo o seu potencial.

Também Watson et al. (2007) indicam vários testes que validam a aplicação da TOC aos sistemas produtivos, referindo também que esta metodologia conduz a melhores resultados quando comparada com a aplicação do MRP ou *Lean Manufacturing*.

A variabilidade de uma linha de produção é preponderante na escolha do balanceamento. Como foi descrito, as linhas perfeitamente balanceadas apenas funcionam corretamente em sistemas sem grandes variações na procura, produto e processos. Devido à falta de capacidade “protetora” nestes sistemas, qualquer variação negativa na linha afeta imediatamente o seu *T*. Segundo Sproull (2009), já foi amplamente provado que uma linha perfeitamente balanceada resulta sempre em falhas no abastecimento à restrição.

Num mercado atual em constante mudança, a variação na procura é permanente, tendo as organizações que lidar com ela. Por outro lado, em busca da satisfação do cliente, as organizações tendem a aumentar a personalização dos seus produtos introduzindo enorme variabilidade no seu processo produtivo.

Como eliminar toda a variação presente nas linhas representa uma grande e dispendiosa tarefa, a solução passa por utilizar linhas não balanceadas, protegendo as receitas da organização da variabilidade existente através da capacidade extra dos recursos e do *buffer management*.

2.3. Integração da TOC com Lean e Seis Sigma

A realidade atual exige que os líderes procurem alcançar o melhor rendimento com o menor investimento possível (Nave, 2002). Atacar simultaneamente todos os problemas, em todas as áreas, sobrecarrega a organização e não se traduz num ROI satisfatório. A chave para o sucesso do Lean, 6S, e TOC, em termos de maximizar o ROI e o *T* é assegurar que todos os esforços são feitos na área correta. A Teoria das Restrições fornece esse foco na restrição do sistema enquanto o Lean e 6S facultam as ferramentas necessárias à implementação da melhoria (Sproull, 2009).

Assim, Sproull (2009) sugere o uso das três metodologias, juntas, como forma de melhoria contínua do sistema. Este autor refere também que não só o Lean e 6S são ingredientes necessários ao sucesso da TOC, como estas iniciativas devem ser conduzidas baseadas na TOC pois esta fornece o foco e os passos certos necessários para a melhoria contínua. Vários outros autores como Goldratt (Goldratt Institute, 2009), Pirasteh e Farah (2006) e Woepffel (2009) também citam a integração das três metodologias como solução para muitos dos problemas existentes nas organizações. Esta integração é geralmente denominada TLS (TOC, Lean, Six Sigma) embora Sproull (2009) a denomine UIC (*Ultimate Improvement Cycle*) e Goldratt TOCLSS.

A abordagem TLS soluciona os problemas recorrentes dos programas de melhoria contínua, permitindo que as ferramentas de cada metodologia funcionem em conjunto, com harmonia, em busca dos resultados exigidos pelos líderes. O objetivo é tornar o programa de melhoria contínua das organizações numa fonte de proveitos, elevando a sua saúde e competitividade. Woepfel (2009) resume a aplicação de cada uma das teorias:

- A TOC permite sincronizar o sistema e manter o foco nos pontos de alavancagem para alcançar as receitas máximas;
- As ferramentas Lean têm o propósito de reduzir os desperdícios nos pontos de alavancagem (ou restrições);
- As ferramentas 6S são implementadas para reduzir a variação nos processos restritivos e assegurar a consistência dos resultados.

Com a integração, as três medidas do objetivo (Receitas, Despesas Operacionais e Investimentos) caminham no sentido desejado a uma taxa superior em relação à tentativa de aplicação de uma só metodologia. O Lean e Seis Sigma trazem o rigor e disciplina à TOC, o que se traduz na redução de desperdícios e variações enquanto o foco está no *T* (Sproull, 2009). Existem na literatura atual várias propostas que sugerem a integração das três metodologias como ingrediente para o sucesso, as quais, não obstante terem semelhantes objetivos, contêm diferenças, evidenciadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Comparação de três integrações da TOC, *Lean* e Seis Sigma

TOCLSS - Goldratt	TLS - Woepfel	UIC - Sproull
1. Mapa Estratégico seguindo os princípios da TOC ↓	1. Estrutura de Melhoria Contínua alinhada com a TOC ↓	1. Identificar: Definir e Compreender e Analisar os processos ↓
2. Planeamento TOC ↓	2. Identificar Restrição e Estabilizar (DBR e BM) ↓	2. Criar Estabilidade ↓
3. Ativação ↓	3. Eliminar Desperdícios - Lean ↓	3. Criar Fluxo e Puxar ↓
4. Melhorar – Técnicas Lean e Seis Sigma ↓	4. Eliminar Variação – Seis Sigma ↓	4. Controlo do Processo para consolidar ganhos
5. Sustentar os ganhos	5. Subordinar e Elevar Restrição ↓	
	6. Atingir novo patamar	

A TOCLSS proposta por Goldratt (Goldratt Institute, 2009) inicia-se com o desenvolvimento de um mapa estratégico que direcione as ações da organização para a área correta, de forma a aumentar os seus resultados. De seguida são reconfiguradas as políticas, medidas de desempenho e regras da organização segundo os princípios da TOC, e são concebidas as operações que tornem o sistema estável e previsível, focando-se as mesmas na gestão e proteção da restrição. No terceiro passo são implementadas as ações anteriormente planeadas, com o intuito de obter um sistema com resultados previsíveis para posteriormente serem introduzidas as ferramentas do Lean e Seis Sigma, através da aplicação de contínuas ações de melhoria de modo a aumentar o *T* e diminuir o *I* e *OE*. Por último, são institucionalizados os processos e melhorias provocadas, sustentando os ganhos. Também são documentados os detalhes da estratégia e implementação antes do ciclo recomeçar.

Por seu turno Woeppel (2009), ao invés de um mapa estratégico, concentra-se inicialmente na criação de uma estrutura interna de melhoria contínua, que esteja em sintonia com os princípios e medidas de desempenho da TOC. Esta estrutura vai administrar os projetos de melhoria, alinhando as equipas de trabalho com os objetivos da organização. De seguida, e tal como Goldratt, é identificado o ponto de alavanca do sistema (restrição atual) e é estabilizado o processo através do DBR e BM. Uma importante diferença desta metodologia, é a aplicação das ferramentas Lean (terceiro passo) e Seis Sigma (quarto passo) não ser simultânea. Este autor defende que devem em primeiro lugar ser reduzidos os desperdícios na restrição e definidos os seus elementos chave, e só depois se procura reduzir a variação no recurso restritivo e ao seu redor. Enquanto são implementadas as ações de melhoria, no quinto passo assegura-se a sincronização da restrição com os restantes elementos, e se o seu *T* ainda não for o desejado deve-se ponderar adquirir capacidade. Por último, aumentada a capacidade da organização, o processo é reiniciado identificando-se a nova restrição do sistema.

O ciclo de Sproull (2009) tem a sua ideia central, tal como os restantes autores, nos cinco passos da Teoria das Restrições, e também aplica as ferramentas e ações inerentes ao LSS nas principais restrições do sistema. Contudo, ao passo que nas metodologias já explicitadas, os conceitos do Lean e Seis Sigma só são introduzidos após serem estabelecidos os princípios, planeamento e estabilização do sistema segundo a TOC, no UIC as três metodologias são simultaneamente aplicadas em cada um dos quatro passos do ciclo:

- 1) Identificar: na primeira etapa efetua-se a definição, compreensão e análise dos processos da organização. Caracteriza-se a cadeia de valor, as medidas de desempenho e identifica-se a atual e a próxima restrição do sistema. De seguida é necessário procurar na restrição, e nos processos a jusante e montante, as potenciais fontes de desperdício, de variação e defeitos. Esta etapa é a base de todo o processo de melhoria pois permite concentrar os recursos onde eles vão trazer mais benefícios à

organização. Na tentativa de encontrar a restrição é necessário procurar e analisar a razão da sua existência.

2) Criar estabilidade: Numa primeira fase desta etapa deve-se planejar como explorar a restrição e como tornar o processo mais estável, previsível e consistente. De seguida o plano é executado, com a aplicação de um conjunto de ferramentas e técnicas na operação que limita o sistema. A comunicação entre os recursos que procuram eliminar desperdícios e os recursos focados na variação e defeitos é extremamente importante, devem estar em permanente colaboração. Uma parte da análise também deve incidir nos processos que antecedem e que sucedem a restrição se estes são potencialmente ameaças para a mesma. Por último, o DBR é introduzido de modo assegurar o correto abastecimento da restrição. O resultado será uma restrição com menores desperdícios, reduzida variação e defeitos, e consequentemente uma diminuição no tempo de ciclo e *lead time*.

3) Criar fluxo e puxar: Obtido um processo estável e consistente, otimiza-se o fluxo de materiais, informação e produtos ao longo do processo e os recursos com extra capacidade são subordinados à restrição. São realizados esforços para diminuir tempos de processamento e o fluxo. Efetua-se uma avaliação aos recursos não-restritivos em busca de oportunidades para tirar carga à restrição sem provocar com isso uma nova restrição e calcula-se os novos tempos de processamentos. Por último, otimiza-se o tamanho dos *buffers* e aperfeiçoa-se o sistema DBR e BM efetuando as correções necessárias (depois de eliminados defeitos, variação e desperdícios na segunda etapa).

4) Controlo do processo para consolidar os ganhos: Na última etapa é elaborado e aplicado o plano para elevar a restrição (caso seja necessário) e é assegurado que todas as ações de melhoria não são desperdiçadas. Caso a restrição não tenha sido quebrada, pode ser necessário adquirir mais recursos e gastar dinheiro para dotar a restrição de mais capacidade, seja em pessoal, horas extra, equipamento, etc. Esta adição de recursos pode ser temporária, sendo que a flexibilidade tem aqui um papel importante. Se a restrição já tiver sido quebrada revê-se todo o processo, políticas e implementações. Por último são introduzidas ações de controlo para proteger os ganhos já adquiridos. De modo a impedir a inércia do sistema o ciclo nunca para, existe sempre uma restrição para ser quebrada.

A combinação das três iniciativas proposta por Sproull (2009), pretende alcançar um ciclo de melhoria que junta a essência do Lean e 6S com a potência de foco da TOC, para oferecer uma poderosa e convincente metodologia de melhoria contínua. Segundo o autor, esta aproximação não consiste numa coleção de ferramentas e técnicas mas antes numa estratégia de produção viável e prática, que foca os recursos disponíveis na área que gera maior ROI, elevando a operação ou política que restringe a organização de realizar todo o seu potencial.

Através das três integrações consultadas, as principais diferenças encontradas são na definição do primeiro passo e na aplicação das ferramentas Lean e Seis Sigma. Contudo, e embora os autores iniciem a metodologia com diferentes ideias, estas convergem no seu objetivo: identificar a atual restrição do sistema e preparar a organização para implementar a filosofia inerente à TOC. Neste passo, Sproull também dá importância à identificação de potenciais restrições do sistema pois a sua prévia definição é uma grande ajuda para o próximo ciclo da melhoria contínua. Do mesmo modo ambas recorrem à TOC no passo seguinte, para estabilizar os processos básicos do sistema através do DBR e do BM, procurando que a variabilidade dos processos não influencie as entregas ao cliente (e sua satisfação), dando simultaneamente tempo às equipas de melhoria, para se focarem nos processos restritivos.

Relevante é também o facto de Sproull implementar o DBR depois de eliminados os desperdícios e a variação na restrição, ao passo que os restantes autores introduzem o Lean e Seis Sigma depois de estabilizado o processo com o DBR. Nesta dissertação considera-se que segunda metodologia é a mais adequada pois a restrição do sistema deve ser protegida o quanto antes, de modo a não afetar o seu T . Introduzidas as melhorias que reduzem os desperdícios e variação da restrição do sistema, é de seguida otimizado o DBR e o BM, esperando-se que o *lead time* e o WIP no sistema tenham diminuído substancialmente.

Por último, se a restrição tiver sido quebrada, são introduzidos mecanismos de controlo para sustentar os ganhos conseguidos e sistemas de aviso de modo a prevenir a variabilidade nos processos. Caso a restrição se mantenha e o T não seja o desejado, será necessário um esforço financeiro na adição de capacidade à restrição do sistema. Quando a restrição é quebrada, o ponto de alavancagem muda de local e abordagem volta ao início. A TLS utiliza assim a sinergia entre o Lean, 6S e TOC para fornecer uma metodologia de melhoria contínua focada no sistema. Na figura 2.9 está resumida a sequência de ações inerente a esta abordagem.



Figura 2.9: Resumo da aplicação da TLS

A aplicação da TLS mais conhecida foi realizada na Sanmina-SCI (Woepel, 2009), organização que inicialmente usava o Lean e 6S para encontrar e eliminar as causas dos seus problemas. Embora dessa aplicação resultasse uma redução de custos e melhorias em alguns processos, os seus líderes não estavam satisfeitos com os resultados após tantos esforços, e decidiram procurar uma solução que proporcionasse mais rendimentos. Foi comparada a aplicação de diferentes estratégias em 21 fábricas da organização: 11 das quais aplicaram o 6S, 4 adotaram o Lean e as restantes 6 a abordagem

integrada TLS. O sucesso de cada estratégia foi determinado pela sua contribuição para as poupanças atingidas, e pelo registo de uma série de indicadores chave que permitiram à firma tomar decisões quantitativas e selecionar a abordagem que melhor ajude a atingir as exigências de qualidade e custos.

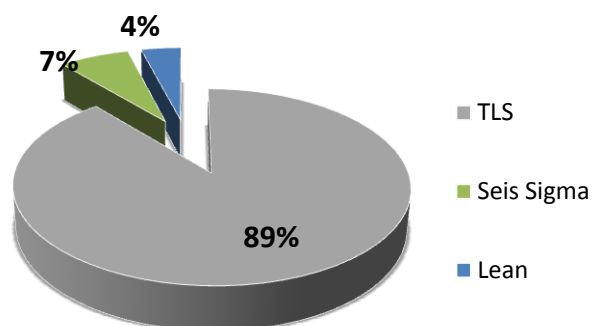


Figura 2.10: Percentagem de contribuição para a poupança de custos

O resultado, visível na figura 2.10, demonstrou que as fábricas que adotaram a abordagem integrada TLS, destacaram-se largamente na redução de custos perfazendo 89% do total das poupanças atingidas. A estratégia revelou-se um sucesso, traduzindo-se na satisfação de operadores e líderes além de compensar amplamente os esforços realizados (Pirasteh & Farah, 2006).

Também Kasemset (2011) investigou e comparou a utilização individual da TOC, como processo melhoria contínua, com a sua combinação com outras metodologias (Lean e 6S) concluindo que o segundo grupo apresentava notáveis melhorias em comparação com o primeiro. Ehie (2005) por seu lado, examinou a integração da TOC com o 6S e realizou uma aplicação na *ABS Corporation* com tremendo sucesso, demonstrando que a integração gerava poupanças superiores em relação à aplicação do 6S isoladamente, confirmando que uma abordagem integrada destas teorias aumenta o desempenho da organização.

Woeppel (2009) assegura que a integração das três teorias pode gerar entre 15 a 20 vezes melhor desempenho que somente a aplicação do Lean ou Seis Sigma. Uma abordagem integrada também permite uma cooperação entre diferentes equipas de trabalho, em vez de uma competição, o que traz vantagens à organização (Kasemset, 2011).

A integração das metodologias, segundo Sproull (2009), é mais fácil do que parece, pois o sistema tem uma única restrição de cada vez, e por isso menos problemas para resolver em simultâneo, ou menos desperdícios para remover. A organização deverá assim ter um fluxo produtivo mais curto, menos caótico e desorganizado, operadores motivados e um aumento das receitas e do ROI.

3. Simulação aplicada às Linhas de Produção

Constituindo uma popular e poderosa ferramenta na reprodução do comportamento dos sistemas reais, a simulação tem tido uma crescente aplicação em múltiplas áreas, muito ajudada pela evolução de computadores e *softwares* especializados (Swain, 2013). Neste capítulo será efetuada uma revisão da simulação e da sua abordagem ao estudo de sistemas, e serão referenciadas as suas diferentes aplicações, vantagens e desvantagens, sendo por último apresentado o conjunto de etapas a perfazer para um estudo de simulação bem-sucedido.

3.1. A Simulação no mundo atual

Em fábricas, num terminal portuário ou na segurança de um aeroporto, líderes de todos os sectores económicos estão a aperceber-se do valor da simulação, não como tecnologia mas como ferramenta para a resolução de problemas. Num contexto económico em permanente mudança, a simulação está a ganhar um lugar nos centros de apoio à decisão, seja no suporte aos conceitos Lean, melhorando a eficiência das operações ou fornecendo informações sobre novos projetos (Greenwood & Beaverstock, 2011).

A simulação proporciona uma incomparável capacidade de imaginar o mundo como ele é, e como poderá ser no futuro, seja um mundo de produção mais eficiente, com cadeias de abastecimento mais ágeis, ou com sistemas de saúde ideais (Swain, 2013).

Consistindo numa das técnicas de investigação operacional mais utilizada a nível global (Law, 2007), caracteriza-se pela utilização de modelos matemáticos e computacionais que ajudam e suportam a tomada de decisão. Recorre-se à simulação para imitar o funcionamento de uma enorme variedade de processos ou instalações, sendo o objeto de estudo chamado de sistema. De forma a analisar cientificamente o sistema são estabelecidos pressupostos sobre o seu funcionamento que tomam a forma de relações lógicas ou matemáticas, e que constituem o modelo (Law, 2007).

Ingalls (2011) define a simulação como “o processo de desenvolvimento de um modelo dinâmico, a partir de um sistema real, com a finalidade de compreender o comportamento do sistema ou avaliar diferentes estratégias para o seu funcionamento”. Para este autor, a simulação é uma poderosa ferramenta, se compreendida e utilizada corretamente.

Por seu turno White e Ingalls (2009) referem-se à simulação, como “uma abordagem específica para estudar modelos”. Através de experiências, o utilizador tenta inferir do modelo para o sistema real. Recorre-se a modelos quando a investigação do sistema é impraticável ou proibitiva, ou para estudar sistemas conceptuais. Os modelos são geralmente simplificações, que abrangem apenas o âmbito e nível de detalhe necessário para satisfazer os objetivos do estudo. Assim, para estes autores, simular

envolve criar um modelo que reproduza o comportamento desejado, gerar observações e procurar compreender, resumir ou generalizar os seus comportamentos. A sua aplicação também pode consistir em testar e comparar diferentes alternativas na configuração do modelo, ou validar e explicar resultados ou recomendações. A simulação tem provado ser um poderoso auxílio à aprendizagem, conceção e resolução de problemas (White & Ingalls, 2009).

Ingalls (2011) sublinha quatro pontos essenciais à sua introdução e compreensão:

- 1) A simulação é construída para imitar os comportamentos dinâmicos dos sistemas. Quanto mais complexo for um sistema, mais tempo levará a elaborar, correr e evoluir o modelo. Sistemas complexos exigem especialistas na matéria.
- 2) É importante que os responsáveis por analisar o sistema tenham bons conhecimentos estatísticos, o *input* das distribuições e a análise do *output* deve ser efetuada corretamente, para não invalidar os resultados da simulação.
- 3) Embora utilizada para comparar cenários alternativos, a simulação não escolhe o melhor cenário. Permite contudo, analisar toda a dinâmica do sistema e não apenas o seu normal comportamento.
- 4) O conhecimento do sistema e do seu funcionamento são valiosos na escolha do melhor cenário por parte do utilizador.

3.2. Estudo de sistemas recorrendo a Modelos de Simulação

A análise de um sistema real, por via da elaboração de um modelo de simulação, implica que previamente se ponderem outras opções, como se demonstra na figura 3.1.

Na possibilidade de estudar o funcionamento de um sistema através da realização de experiências no próprio sistema, este método deve ser preferencialmente utilizado pois não permite o levantamento de dúvidas em relação à validade do estudo. Frequentemente, este procedimento é dispendioso, implica perder muito tempo ou causa grandes constrangimentos na atividade do sistema sendo que na maior parte das situações as experiências tem de ser efetuadas num modelo. Noutros casos, o sistema é apenas conceptual e o objetivo é determinar a sua configuração inicial, sendo obrigatório recorrer a uma representação válida do sistema (Law, 2007; White & Ingalls, 2009). Nestas situações, a construção de um modelo permite não só estudar o sistema sem causar prejuízos, como oferece uma liberdade total para ensaiar diferentes ideias e soluções impossíveis de testar recorrendo diretamente ao sistema (Kelton, Sadowski, & Sadowski, 2002).

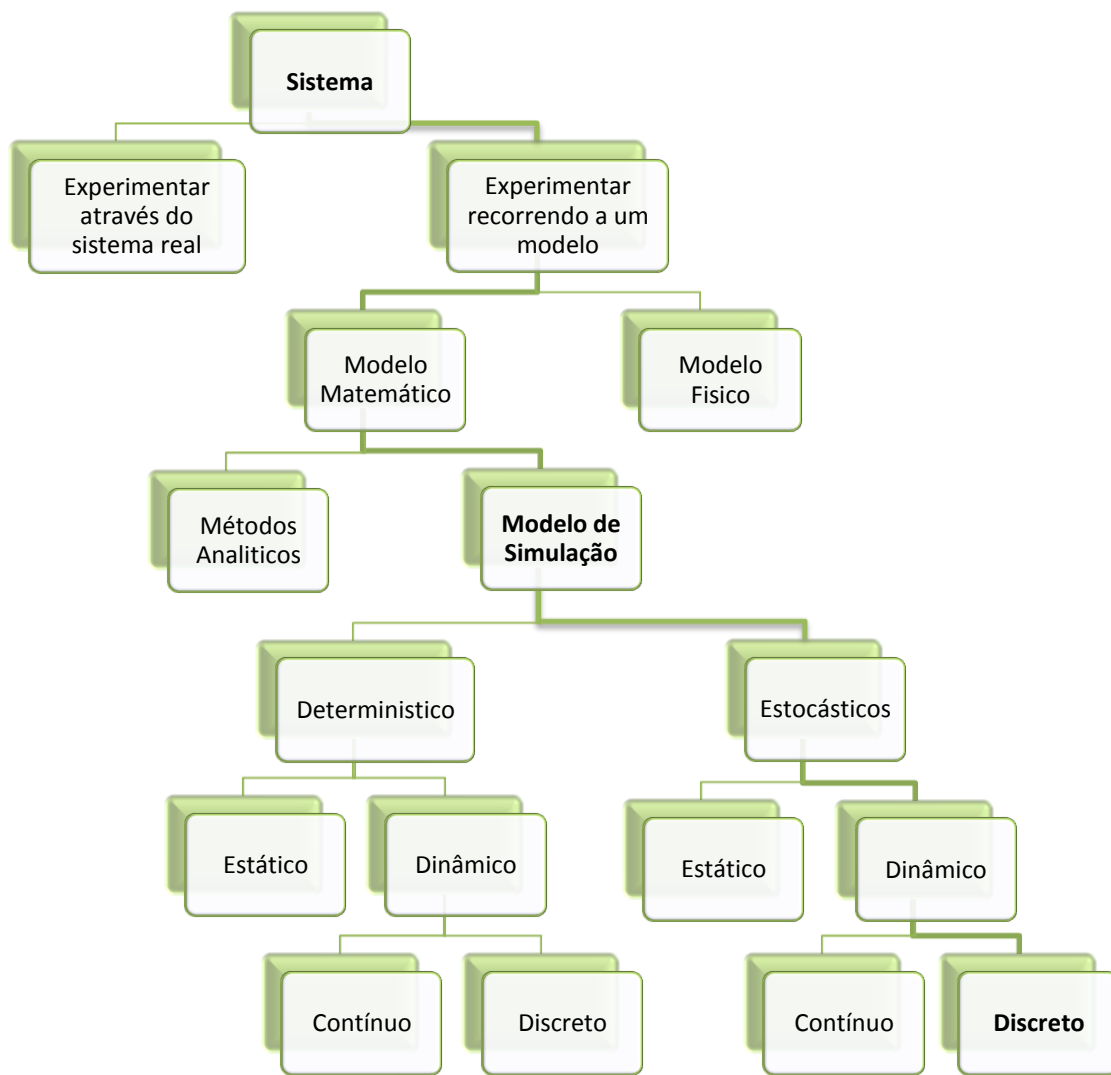


Figura 3.1: Formas de estudar o sistema e caracterização dos modelos

Ainda que existam exemplos de modelos físicos aplicados na análise de sistemas, a vasta maioria de modelos construídos para este propósito são matemáticos. Estes fazem geralmente uso de programas informáticos, para representar o sistema através de relações lógicas e matemáticas, que são manipuladas para verificar como o modelo, e consequentemente o sistema, reage às diferentes configurações.

Dentro dos modelos matemáticos, é vantajoso utilizar uma abordagem analítica se as relações que compõem o modelo forem suficientemente simples, pois estes métodos dão respostas exatas aos problemas. Contudo, a elevada complexidade dos sistemas torna a sua computação pouco eficiente sendo que raramente é possível solucionar o problema analiticamente, optando-se por estudar o modelo através da simulação. Recorrendo a *softwares* concebidos para imitar os processos e características dos sistemas ao longo do tempo, exercita-se numericamente os *inputs* do modelo, verifica-se como estes afetam o seu *output* e, ao invés de respostas exatas, obtêm-se estimativas das medidas de desempenho do sistema.

Assim, e não sendo a única ferramenta empregada no estudo de modelos, a simulação é frequentemente o método escolhido. A razão prende-se com o facto de os modelos de simulação conseguirem ser bastante complexos, enquanto outros métodos requerem excessivas simplificações para analisarem o modelo, colocando a sua validade em causa. Para ser válido, o modelo deve ser construído cautelosamente para a aprendizagem retirada do modelo não diferir da possível aprendizagem feita diretamente a partir do sistema (Kelton et al., 2002; Law, 2007; White & Ingalls, 2009).

Outra vantagem da simulação em relação às soluções analíticas é a sua capacidade de demonstrar visualmente o comportamento do sistema, o que é crítico para a comunicação, análise, marketing, e mesmo para a verificação e validação do modelo. A visualização é certamente mais apelativa que um conjunto de dados estatísticos (Swain, 2013).

Como é visível na figura 3.1, os modelos de simulação são classificados por Law (2007) segundo três dimensões:

Modelos Determinísticos ou Estocásticos: Um modelo determinístico não contém componentes aleatórios ou probabilidades. A variabilidade presente na generalidade dos sistemas exige modelos estocásticos, como sistemas de filas de espera ou de inventários. O seu *output* deve ser tratado como uma estimativa das verdadeiras características do modelo, e por isso corretamente analisado.

Modelos Dinâmicos ou Estáticos: Os modelos estáticos representam o sistema num determinado momento, a passagem de tempo não é relevante, ao invés dos modelos dinâmicos que representam o sistema à medida que este evolui com o tempo.

Modelos Contínuos e Discretos: A diferença entre modelos contínuos e discretos é o modo como o estado do modelo se altera no tempo. Nos modelos contínuos o estado da variável altera-se continuamente no tempo (ex. um avião a deslocar-se no ar), ao passo que nos modelos discretos o estado do modelo altera-se instantaneamente em pontos separados no tempo, denominados eventos ou acontecimentos. O tempo de simulação avança consoante os eventos calendarizados, ao invés de avançar segundo intervalos de tempo fixos (Ingalls, 2011).

Jahangirian et al. (Jahangirian, Eldabi, Naseer, Stergioulas, & Young, 2010) numa revisão da aplicação das técnicas de simulação em sectores industriais, abrangendo artigos entre 1997 e 2006, concluíram que a simulação de acontecimentos discretos (*Discrete Event Simulation* - DES) é a técnica dominante nas aplicações da simulação a este sector. Os modelos DES, são estocásticos, dinâmicos e discretos e tendem a ser adequados para análises detalhadas de processos, gestão de recursos ou filas de espera, tendo os autores verificado múltiplas aplicações no âmbito da gestão operacional, desde o planeamento e controlo da produção, à engenharia de processos, gestão de *stocks*, gestão de projetos ou da cadeia de abastecimento, e em indústrias diversificadas.

Na simulação de acontecimentos discretos (DES), o sistema é composto por unidades discretas que se movem de um ponto para outro no sistema, competindo entre si pelo uso dos escassos recursos. Nesta definição cabem sistemas como a produção, prestação de serviços, cuidados de saúde, entre outros sistemas com filas de espera (Schriber, Brunner, & Smith, 2012). A diferença e poder da DES é a sua capacidade de imitar a dinâmica dos sistemas reais. É esta capacidade que lhe dá a sua estrutura, funções, e modo único de analisar resultados. A maioria das estruturas dos modelos de simulação discretos é composta pelos mesmos componentes, tais como entidades, acontecimentos, atividades, recursos, gerador de números aleatórios, calendário, entre outros. Uma sua definição por ser encontrada em Ingalls (2011), Kelton et al. (2002) ou Law (2007).

Os modelos DES têm assim provado ser uma excelente ferramenta na modelação, análise e melhoria do desempenho dos sistemas produtivos. A proliferação de *softwares* acessíveis, de fácil aprendizagem, contribuiu para o rápido aumento das suas aplicações (Skoogh, Perera, & Johansson, 2012).

3.3. Aplicação da Simulação e *Softwares*

Generalizando, e segundo White e Ingalls (2009), podem-se considerar duas grandes categorias de aplicação da simulação. A primeira diz respeito à simulação usada para treino ou entretenimento, onde se insere desde a preparação de pilotos nos simuladores de voo aos mais diversificados jogos de computador. A segunda categoria consiste no domínio mais técnico que engenheiros e investigadores associam à simulação e que inclui a análise e conceção de produtos e processos. Vai desde o projeto de um novo veículo aos túneis de vento utilizados para simular o comportamento aerodinâmico de modelos de escala.

Este trabalho incide na segunda categoria, mais precisamente na análise de um conjunto de processos, através de um *software* que, entre outras aplicações, permite modelar toda a linha de produção de uma fábrica. Embora a simulação discreta possa ser realizada através cálculos manuais, a complexidade e quantidade de dados dos sistemas reais torna o recurso a *softwares* inevitável.

Os computadores são um elemento crítico na avaliação de complexos problemas de simulação, pois além de conseguirem produzir enormes quantidades de tempo em poucos minutos, produzem relatórios completos que ajudam à tomada de decisão (Heizer & Render, 2004). Assim, previamente à aplicação da simulação é relevante analisar a diversidade dos simuladores disponíveis e as suas aplicações.

Os *softwares* de simulação existentes nos dias de hoje são impressionantes no seu alcance, capacidade e sofisticação, prestando um apoio sem paralelo ao desenvolvimento, visionamento e análise de complexos modelos, com aplicações em múltiplas áreas. Muitos dos simuladores incluem uma

capacidade para comunicar com outras aplicações, ou tirar proveitos de programas de otimização para realizar ajustamentos nos modelos de forma a reduzir custos, riscos, ou atrasos. Estas capacidades são o culminar de mais de meio século de evolução de *software*, *hardware* e investigação na simulação (Swain, 2011).

James Swain (2013) realiza um inquérito bianual, direcionado aos fornecedores de *softwares* de simulação, com informação referente às capacidades, características e áreas de aplicação de cada *software*. Neste inquérito, são omissos os produtos direcionados à simulação contínua ou ao treino, sendo dada ênfase aos simuladores utilizados para executar simulações de eventos discretos pois, segundo o autor, são os mais adequados para aplicar em ciências de gestão e operações.

No último inquérito, realizado em 2013, foram registados 43 produtos, provenientes de 23 fornecedores, tendo o autor vindo a observar um contínuo aumento da gama e variedade dos simuladores, o que reflete a robustez dos produtos e a crescente sofisticação dos utilizadores.

Para esta evolução, têm contribuído a combinação das melhorias introduzidas na análise, com o poder da obtenção de significantes replicações, o que aumentou substancialmente a precisão dos indicadores estatísticos que resultam da simulação, e a possível combinação de diferentes cenários. Os modernos simuladores dão cada vez respostas mais precisas aos problemas (Swain, 2013).

Algumas das ferramentas presentes no inquérito são desenhadas para a modelação de problemas gerais, enquanto outras, focam-se na aplicação em áreas específicas como os serviços, a produção ou a saúde. Muitos dos simuladores permitem às organizações construir os seus próprios e específicos modelos, que vão sendo desenvolvidos baseados na sua experiência e conhecimento (Swain, 2013). Com base nos resultados obtidos, Swain (2013) resume as principais áreas de aplicação dos simuladores de eventos discretos:

- Com o crescente recurso ao *outsourcing*, a logística, cadeia de abastecimento e sistemas de transportes das organizações têm sido frequentemente objeto de estudos de simulação. Desde o transporte de cargas, gestão de operações em terminais ou centros de distribuição, determinar a melhor rota de transporte, ou mesmo a introdução de novas tecnologias na gestão de armazéns são aplicações frequentemente testadas. Examinar o sistema de informação que suporta a cadeia de abastecimento e quantificar ou atenuar os riscos existentes é outra possível utilização desta ferramenta.

- Produção: A otimização de processos e operações nos sistemas produtivos continua a ser uma importante área da simulação, o que se reflete nos inúmeros produtos identificados no inquérito que disponibilizam soluções nesta área. Muitos estudos incidem agora nas metodologias Lean e Seis Sigma.

- Segurança: Para além da área militar, onde a simulação é usada há décadas, na área não militar várias aplicações têm surgido na análise da segurança, seja em aeroportos ou em grandes eventos desportivos. Também é utilizada para planear planos de emergências e de evacuações.

-Saúde: área de intenso uso da simulação a todos os níveis, desde o planejamento, aos recursos humanos, salas de emergência, unidades de cirurgia entre outras. Devido ao seu impacto no PIB esta área continuará a ser alvo de muitos estudos, e terá na simulação uma ferramenta preciosa.

Selecionar corretamente a ferramenta de simulação a utilizar requer ponderação e cuidado. Existem diferenças nas implementações práticas dos vários simuladores, que devem ser do conhecimento dos utilizadores. Estes devem estar cientes da resposta do simulador a determinados *inputs* e ter bom conhecimento do seu funcionamento (Schriber et al., 2012).

Como itens principais na ajuda à tomada de decisão Vasudevan et. al (Vasudevan, Lote, Williams, & Ulgen, 2009) referem: a animação (2D ou 3D), a familiaridade com o *software*, ou seja, o nível de conhecimento que o utilizador tem da ferramenta, a necessidade de alguns componentes específicos (como transportadores automáticos ou pontes rolantes) e o apoio que o fornecedor dá ao *software* depois da venda. Mais concretamente em projetos na área da produção, outros dois critérios ganham importância: os objetivos do modelo e a aptidão do *software* na simulação discreta, contínua, ou a capacidade de integrar os dois conceitos.

3.4. Vantagens e Desvantagens da Simulação

A evolução da simulação e dos *softwares* especializados, cada vez mais poderosos, flexíveis e fáceis de utilizar, tem permitido a sua aceitação e consequente aplicação por um cada vez maior número de equipas de gestão. Este aumento da popularidade da simulação é explicado pelos seus múltiplos benefícios, que podem ser resumidos em alguns pontos (Heizer & Render, 2004; Kelton et al., 2002; Law, 2007):

- Proporciona uma réplica mais realista de um sistema do que a análise matemática;
- Permite a utilização na análise de problemas complexos, que dificilmente são resolvidos através dos métodos tradicionais. É versátil e a sua área de aplicação não tem limites;
- Possibilita a inclusão de complicações, como elementos estocásticos, que a maioria dos modelos não permite, como o uso de qualquer distribuição de probabilidade definida pelo utilizador;
- Rapidez: o tempo pode ser comprimido na simulação, em poucos minutos, simulam-se anos de produção no sistema real;
- Não interfere com o sistema real: permite estimar o desempenho de um sistema sem afetar o curso do mesmo;
- Responde a questões do tipo “E se” – permite comparar cenários alternativos verificando qual o que melhor satisfaz os objetivos do estudo;
- Possibilita o estudo individual dos efeitos e interações que os diversos componentes e variáveis têm no sistema, revelando quais os mais importantes.

Como já foi referido, a simulação também tem as suas desvantagens, sendo em alguns casos preferível optar por métodos alternativos. Os seus pontos negativos resultam na sua maioria da incerteza dos seus resultados. As suas principais desvantagens são de seguida descritas:

- Não gera soluções exatas. Cada replicação produz apenas estimativas das características do modelo consoante os dados introduzidos. Produz diferentes resultados em diferentes replicações;
- Como a maioria dos modelos envolve *inputs* não controláveis e estocásticos, o seu *output* também será aleatório;
- É necessário reproduzir no modelo todas as condições e restrições do sistema real, só com um *input* realístico e um modelo válido a simulação pode dar respostas corretas;
- Cada modelo de simulação é único e as suas soluções não se podem transferir para outros problemas;
- O desenvolvimento de um modelo de simulação é frequentemente dispendioso e a sua construção consome muito tempo.

Embora os resultados da simulação não sejam exatos, existem formas de lidar com esta incerteza, quantifica-la, ou reduzi-la como por exemplo perfazendo simulações mais longas – até atingir o estado estacionário - ou mais replicações, tornando a média dos resultados semelhante. Por outro lado, simplificando o modelo reduz-se a incerteza dos seus resultados, mas provavelmente este não será uma válida representação do sistema. Por conseguinte é preferível obter uma resposta aproximada para um problema correto, bem representado, do que uma solução exata para um problema errado (Kelton et al., 2002).

3.5. Etapas de um Estudo de Simulação

Para o sucesso de um estudo de simulação e sua posterior validação, é crítico seguir uma abordagem pré-definida que conduza a construção do modelo a uma representação fiel da realidade. Ao substituírem a realização de experiências no sistema, os modelos de simulação devem aproximar-se ao máximo da realidade, diminuindo a probabilidade de resultarem em conclusões erróneas e consequentemente em decisões dispendiosas para a organização (Law, 2009).

White e Ingalls (2009) referem que é necessário realizar competentemente um conjunto de diferentes atividades no desenvolvimento de um estudo de simulação, de modo a extrair real conhecimento a partir da informação e dados recolhidos. Na figura 3.2 é representado um resumo dessas atividades e o seu alcance.

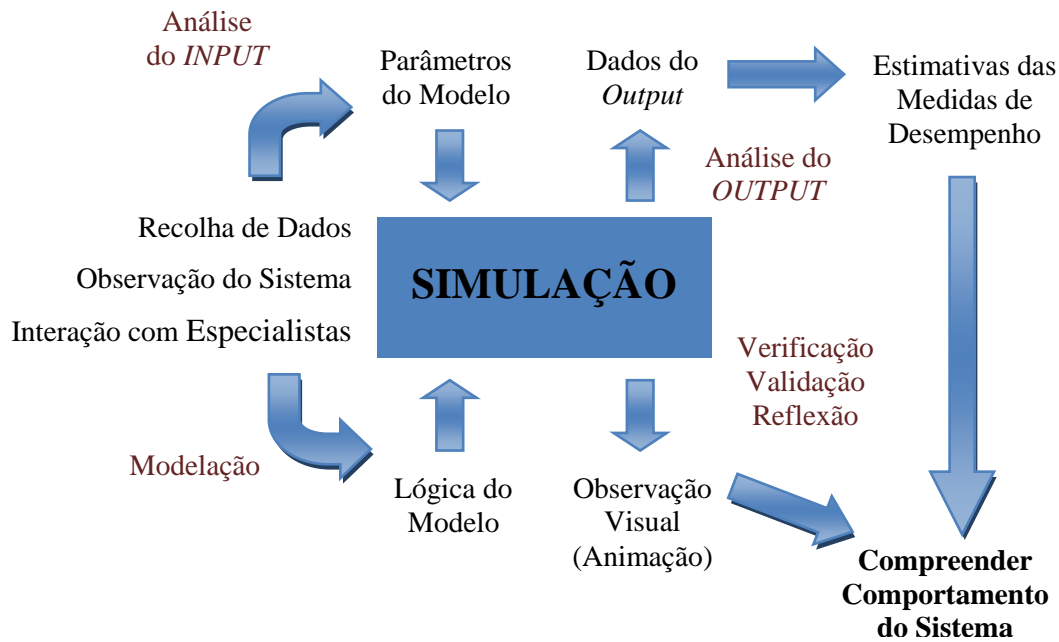


Figura 3.2: Atividades e alcance da Simulação

[Adaptado de White e Ingalls (2009): p.22]

Para compreender todo o comportamento do sistema, ou avaliar diferentes cenários, é assim indispensável além da modelação no *software*, realizar diferentes tipos de atividades maioritariamente relacionadas com o *input* e o *output* do modelo. Um bom conhecimento do sistema real também é crucial, o que implica diversas visitas ao mesmo e interação com os seus recursos (Kelton et al., 2002). Previamente à recolha de informação e posterior aplicação da simulação é necessário encontrar respostas para várias questões (Greenwood & Beaverstock, 2011):

- Qual o âmbito do Modelo?
- Qual/Quais o(s) objetivo(s)?
- Quais as medidas de desempenho relevantes?
- Que pressupostos são considerados e como devem ser apresentados os resultados?

A resposta a estas questões integra a primeira etapa de um estudo de simulação, a formulação do problema. Na figura 3.3 são apresentadas as restantes etapas sendo de seguida efetuada uma breve descrição de cada uma:

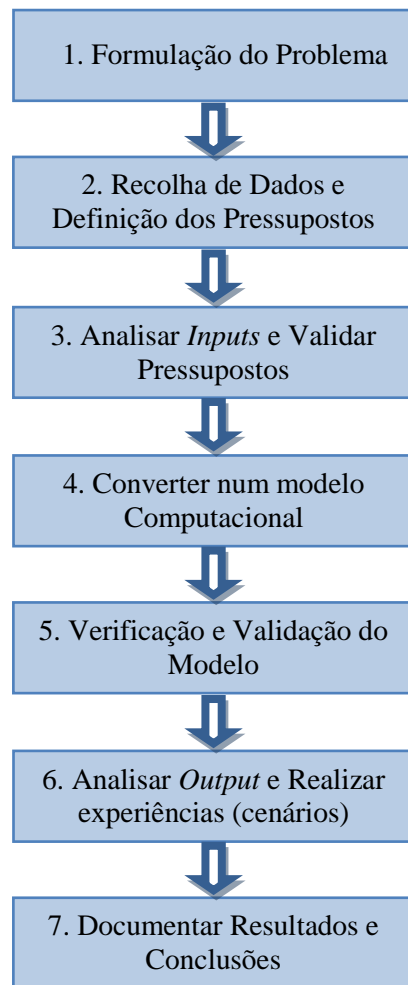


Figura 3.3: Etapas de um estudo de Simulação

[Adaptado de Law (2009): p.26]

- 1) Juntamente com os responsáveis do projeto são definidos objetivos, medidas de desempenho a avaliar, o âmbito, os cenários a abordar e o calendário de execução.
- 2) Obter informação sobre o sistema, seus procedimentos e operações. Recolha de dados para especificar os parâmetros do modelo, distribuições de probabilidade, e sobre desempenho atual do sistema (para futura comparação com o *output* do modelo). Definir pressupostos e nível de detalhe do modelo (depende quantidade de informação recolhida, objetivos, restrições de *software*, tempo e recursos).
- 3) Analisar e seleccionar a informação recolhida para especificar os *inputs* do modelo. Devem ser utilizadas técnicas como os testes de ajustamento para validar os diferentes componentes do modelo. Em conjunto com os responsáveis são validados os pressupostos e os *inputs* do modelo.
- 4) Programar o modelo num *software* de simulação.
- 5) Verificar - corrigir eventuais erros - e Validar o modelo – comparar o *output* do modelo com o *output* do sistema, recolhido anteriormente, para validar os seus resultados. Se os dois conjuntos de

dados do *output* são semelhantes então o modelo é considerado válido. O modelo deve ser revisto pelos responsáveis do projeto.

6) Resolver questões como a duração das corridas de simulação, período de “aquecimento” e número de replicações. Analisar os resultados e experimentar cenários alternativos.

7) Retirar conclusões, documentar resultados e efetuar a animação do modelo para uma melhor compreensão e credibilidade do mesmo.

Após a formulação do problema, Law (2009) aconselha a que a recolha de dados seja obtida através do histórico da organização ou de uma observação direta durante o estudo de simulação. Este autor também refere que é importante conhecer o processo de onde provêm os dados, para não tratar as observações como apenas números abstratos. Este conhecimento pode ser útil para reconhecer *outliers* ou simplesmente erros associados aos dados.

A maioria das etapas dos projetos nesta área interage com os dados de *input* e *output*, sendo a gestão destes dados frequentemente o maior desafio do projeto de simulação. Para Skoogh et al. (2012) a recolha de dados, análise e introdução da informação no modelo de simulação são etapas vitais num projeto. No capítulo seguinte desta dissertação será aprofundado este tema.

Outro dos passos com maior preponderância para a credibilidade de um estudo de simulação é a validação do modelo. Segundo Law (2009), a validação consiste em determinar se um modelo é uma representação exata do sistema, tendo em conta os objetivos do estudo. Um modelo válido permite tomar as mesmas decisões do que caso fosse viável realizar as experiências no próprio sistema. O mesmo autor também refere que os resultados de um modelo de simulação são credíveis se o responsável pela tomada de decisão, ou o diretor do projeto os aceitar como corretos.

4. Metodologia de Estudo

Analisada a temática da Simulação e a sua utilidade na tomada de decisão, esta ferramenta será então utilizada para desenvolver um modelo de acontecimentos discretos (DES), a partir de uma linha de produção real. Posteriormente serão aplicados os conceitos da TOC e do *Drum-Buffer-Rope*, ao modelo desenvolvido, de forma a melhorar o desempenho do sistema produtivo subjacente.

A linha de produção em questão é caracterizada pela variabilidade decorrente de uma produção por encomenda, com múltiplos modelos do mesmo produto e um elevado grau de personalização em cada encomenda. Estas características introduzem substanciais variações nos tempos de processamento das diferentes operações, agravados pela pouca automatização presente neste tipo de sistema produtivo. A mesma operação pode prolongar-se por algumas horas num modelo, e por mais do que um turno no modelo seguinte.

Embora não desejada, a variabilidade está presente no nosso dia-a-dia e é imprescindível lidar com ela. Não obstante uma organização prever a entrega de um produto num determinado prazo, basta uma falha num equipamento ou um problema de qualidade para parar a produção e levar ao incumprimento da data de entrega. A variabilidade pode ser vista como consequência de tudo o que interfere no fluxo produtivo e tem sido definida como uma condição não desejada que representa a diferença entre o estado atual e o estado pretendido (Sproull, 2009).

Como referido na Secção 2.1.1, a variabilidade é uma característica inerente aos sistemas produtivos, que provém tanto de acontecimentos aleatórios como das flutuações estatísticas associadas aos diferentes processos. O facto de frequentemente ser impossível eliminá-la, conduz a que seja necessário desenvolver estratégias por forma a conviver com ela. O primeiro objetivo neste estudo é reproduzir tanto quanto possível no modelo de simulação, a variabilidade existente num sistema através de uma cuidadosa análise dos dados recolhidos da organização, que representem os tempos de processamento das diferentes operações da linha.

Tradicionalmente na TQM, a variação está relacionada com as especificações dos componentes e a capacidade dos processos em produzir dentro dos requisitos. Porém, no âmbito da TOC, a variação envolve ainda os tempos de operações e de movimentação de materiais. É a variação destes itens que torna impossível uma fábrica trabalhar a 100% da sua capacidade (Levinson, 2007). Sproull (2009) salienta dois tipos de variabilidade existentes nos sistemas de produção:

PTV - Variabilidade nos Tempos de Processamento: Ações que prolongam o período que o componente necessita para passar à próxima estação de trabalho. Está relacionado com a rapidez com que as peças perfazem o seu fluxo de produção e o tempo requerido para processar esses materiais em cada operação.

PPV - Variabilidade no Produto e Processo: Variação associada aos parâmetros dos processos físicos usados nas diferentes operações e às características da qualidade inerentes aos produtos.

O âmbito deste trabalho abrange exclusivamente a variabilidade dos tempos de processamento. Esta forma de variação provém tanto de fontes internas como externas, sendo exemplos avarias em equipamentos, métodos de trabalho inconsistentes ou não estandardizados, falhas na entrega por parte dos fornecedores, longos tempos de *setups*, entre outros. Do ponto de vista do *Throughput*, a variabilidade nos tempos de processamento dificulta a capacidade da organização de cumprir as exigências da produção o que se reflete no performance da entrega ao cliente (Sproull, 2009).

Hoop e Spearman (2001) apresentam as cinco fontes de variação nos tempos de processamento que predominam nos ambientes produtivos:

-Variabilidade Natural: Inclui as pequenas flutuações nos tempos de processo devido às normais diferenças entre operadores, equipamentos e materiais e as pequenas fontes de variação geralmente relacionadas com as operações manuais.

-Falhas aleatórias: Os tempos de inatividade não programáveis representam na maioria dos sistemas a principal causa de variabilidade. Avarias, falhas de eletricidade ou emergências são exemplos de comuns falhas incontroláveis, enquanto alterações de ferramentas, intervalos ou reuniões são falhas em que o gestor da organização detém algum controlo.

-Setups: Representa o tempo de preparação de uma estação de trabalho para realizar a operação seguinte. Contém atividades internas (que têm de ser efetuadas com a operação parada) e externas (podem ser realizadas com a operação a decorrer) sendo o objetivo transformar o máximo de atividades internas em externas, como forma de reduzir o tempo de espera.

-Disponibilidade do operador: Refere-se ao tempo em que determinada operação está parada à espera de um operador, como por exemplo, quando é necessário um especialista para realizar determinada tarefa, resolver um problema específico, ou quando o operador está ausente. Atualmente as organizações devem ter operadores flexíveis para evitar estes tempos de espera, particularmente na restrição.

-Reciclagem: Refazer uma operação é uma das maiores fontes de variabilidade juntamente com os *setups* e as avarias. Rouba capacidade ao processo, implica variabilidade e causa maior WIP e aumentos nos tempos de ciclo.

Pelo exposto, a variabilidade presente nos sistemas produtivos desempenha um papel fundamental no seu funcionamento e o estudo de simulação só reproduzirá resultados credíveis caso a mesma seja corretamente caracterizada. Por outro lado, o DBR e o BM poderão impedir a variabilidade de afetar o sistema, protegendo a sua restrição e o *T*.

De acordo com a Secção 3.5, previamente à modelação da linha será necessário a analisar a informação recolhida do sistema para sua correta introdução no modelo. A figura 4.1 resume a metodologia de estudo a adotar no desenvolvimento no caso de estudo, na qual se teve em conta as etapas do estudo de simulação referidas na figura 3.3.

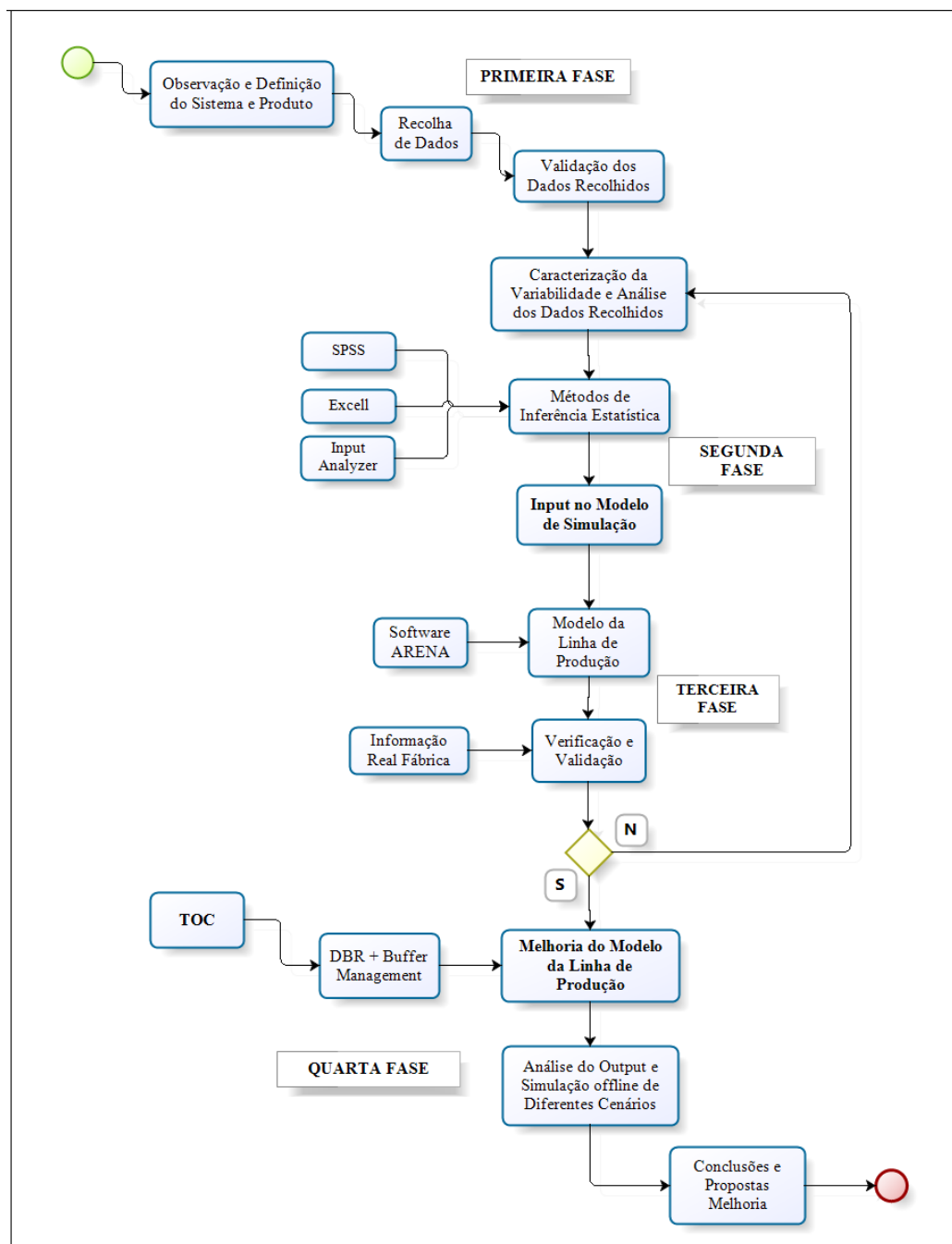


Figura 4.1: Metodologia adotada no desenvolvimento do caso de estudo

Numa primeira fase da metodologia será formulado o problema, definido o sistema, e serão realizadas diversas observações diretamente na fábrica onde serão recolhidas informações sobre todo o funcionamento do sistema e suas variáveis, através de múltiplas reuniões com elementos da

organização, melhores conhecedores do sistema. Os dados recolhidos serão depois comparados com o histórico da organização, através de uma fonte informática, e validados com os gestores do projeto.

Posteriormente, após a sua validação, será efetuada a análise da informação recolhida (análise dos *inputs* no modelo) e caracterizada a variabilidade do sistema através de métodos de inferência estatística, a detalhar no capítulo seguinte da dissertação. Para este efeito poderá recorrer-se à utilização de diversos *softwares* informáticos, tal como o SPSS, que constituem preciosos auxiliares no tratamento estatístico de dados organizacionais.

No caso de estudo aqui tratado (ver cap. seguinte), e de modo a reproduzir mais fielmente a linha de produção, incorporando a variabilidade inerente ao sistema, optar-se-á por utilizar um modelo Estocástico, Dinâmico e Discreto, já que o sistema é discreto pois o estado das variáveis altera-se em pontos distanciados (discretos) no tempo, como por exemplo quando chega uma peça ao sistema, ou quando é terminada certa operação.

Para desenvolver o modelo pretendido, e tendo em conta os itens indicados por Vasudevan et al. (2009) recorreu-se ao simulador *Arena*, devido à familiaridade do utilizador com o *software*, e à sua total capacidade para desenvolver o projeto. Este *software*, desenvolvido pela *Rockwell Automation* consiste num simulador de acontecimentos discretos que usa a linguagem e processador SIMAN.

O *Arena* alia a facilidade de utilização dos melhores simuladores com a flexibilidade de aceder à linguagem de simulação, através da combinação de módulos, tipicamente agrupados em painéis, que ajudam à construção de complexos algarismos e de uma larga variedade de modelos e sua análise. O utilizador também pode criar os seus próprios módulos e *templates* ou aceder a dados de uma aplicação externa. No mesmo ambiente de trabalho, o *Arena* inclui uma animação dinâmica de todos os processos e fornece apoio ao tratamento dos dados estatísticos e sua análise (Kelton et al., 2002).

O seu fabricante, na resposta ao inquérito de Swain (2013), refere que o *ARENA* é tipicamente utilizado para modelar um sistema existente e testar possíveis alterações ao mesmo. As suas principais áreas de aplicação são a Produção, Cadeia de Abastecimento, Saúde, Defesa, Sector petrolífero e Académico. Segundo Stopper e Stuja (2004), o *Arena* foi concebido para engenheiros, consultores e analistas e permite:

- Modelar os processos;
- Simular o desempenho futuro do sistema para compreender as suas complexas relações e identificar oportunidades de melhoria;
- Visualizar as operações através de animações gráficas;
- Analisar o comportamento do sistema na sua configuração atual e sob uma infinidade de possíveis alternativas, permitindo a escolha da mais adequada.

A terceira fase da metodologia será completada com a verificação e validação do modelo de simulação a reproduzir no Arena. O modelo deverá ser uma representação fiel do estado atual da fábrica e os seus *outputs* deverão ser semelhantes. A validação do modelo será avaliada com os responsáveis do projeto, comparando o *output* do modelo com o *output* do sistema real.

Se o modelo for considerado válido, avança-se para a quarta fase da metodologia, aplicando-se os conceitos da Teoria das Restrições à linha de produção em estudo, com o objetivo de simular possíveis alterações na linha que conduzam a uma melhoria do seu desempenho.

Após a introdução da variabilidade do sistema no modelo, a simulação permitirá visualizar a diferença no funcionamento do sistema real com e sem variações e consequentemente, verificar os resultados práticos que a organização poderia atingir se conseguisse eliminar os seus níveis de variabilidade.

Devido às características já referidas da linha de produção a segunda fase da metodologia ganha especial relevância, e é nesta fase que se centra a atenção do estudo, previamente à real aplicação do caso de estudo.

4.1. Análise do *Input* num Modelo de Simulação baseado na Variabilidade de uma Linha de Produção

Os resultados e recomendações provenientes da simulação, serão apenas tão fidedignos quanto o seu modelo e *inputs*. Se os dados recolhidos do sistema não forem rigorosos, não se poderá depositar grande confiança na precisão das suas conclusões. Para atingir uma representação satisfatória do sistema, é necessário observar o sistema real, recolher os dados que correspondam aos *inputs* do modelo e fazer uma análise assertiva desses dados (Kelton et al., 2002).

Também para Kuhl et al. (2009) e Biller e Gunes (2010), a seleção de um *input* válido é um dos principais problemas na construção de modelos estocásticos. Segundo os últimos, “a modelação do *input* é a prática de seleção de distribuições de probabilidade que representem as variáveis aleatórias do sistema” (Biller & Gunes, 2010). Exemplos destas variáveis são os tempos de avaria de uma máquina ou o tempo entre chegadas num banco. O objetivo não é obter um *input* verdadeiro mas sim uma aproximação que capture as características chave de cada processo.

Para uma simulação bem-sucedida, Law (2012) identifica duas armadilhas a evitar, relacionadas com o *input* no modelo. A primeira diz respeito à frequente substituição da distribuição de probabilidade pela sua média, o que segundo o autor, pode conduzir a resultados completamente erróneos, afetando a validade dos *outputs*. Ao contrário da média, as distribuições de probabilidade introduzem a variabilidade que ocorre nos sistemas, tendo um efeito significativo, por exemplo ao nível da gestão de sistemas de filas de espera.

Tendo em conta a utilidade das distribuições em representar as fontes de aleatoriedade dos sistemas, a segunda armadilha referida por Law é a recorrente utilização da distribuição normal no *input* do modelo, quando esta raramente é apropriada para modelar as variações seja em tempos de serviços, de processamento, ou operações de manutenção.

A escolha da distribuição de probabilidade tem assim um largo impacto nos resultados da simulação e potencialmente, na qualidade das decisões tomadas com base nos mesmos. A falha na escolha da distribuição correta afeta a precisão dos resultados do modelo por vezes de forma drástica (Law, 2007).

Por outro lado, tão importante como utilizar dados adequados na construção do modelo, é o cuidado a ter na estruturação desses dados (Law, 2007). A replicação de um sistema através da simulação requer modelos simplificados mas que representem corretamente a realidade, a redução de informação não deve assim afetar o *output* da simulação.

No sistema produtivo em questão, serão fabricados diversos modelos que seguem a mesma sequência de processos, mas que contêm entre si diferenças que devem ser analisadas, decorrentes da elevada personalização de cada encomenda. Resulta assim um conjunto de observações de cada modelo para a mesma operação. Segundo Law (2007), quando são realizadas várias observações para o mesmo fenómeno, a correta junção desses dados pode ser avaliada por testes de inferência estatística. Se o conjunto de dados parecerem ser homogêneos, podem ser fundidos e a combinação dos dados poderá ser utilizada para o mesmo propósito no modelo de simulação.

Em organizações que fabricam diversos modelos que seguem o mesmo fluxo produtivo, e de forma a estruturar corretamente os dados e simplificar o modelo de simulação, é necessário verificar se existem diferenças na duração das operações, consoante o modelo que é processado. Se não existirem diferenças, os dados podem ser agrupados e utilizados para representar a variabilidade existente no processo através de uma distribuição de probabilidade. Caso contrario, será necessário encontrar em cada operação uma distribuição estatística que represente o tempo de processamento do respetivo modelo. Esta análise permitirá à organização apurar em que operações da linha de produção existe maior variabilidade no fabrico dos diferentes modelos. A análise do *input* a introduzir no modelo terá assim dois objetivos:

- (1) Verificar, através dos tempos de processamento, que modelos são significativamente diferentes entre si para serem modelados separadamente em cada operação.
- (2) Ajustar os tempos de processamento à distribuição estatística que melhor represente o seu comportamento ou seja, que se adeque à sua variabilidade.

Os objetivos da análise estão assim relacionados com a necessidade de replicar a variabilidade dos sistemas atuais na simulação, devido à sua extrema importância no funcionamento do sistema. Na

generalidade dos modelos de simulação, e desde que seja possível obter dados do sistema em estudo, as fontes de aleatoriedade do sistema devem ser representadas através de uma distribuição estatística (Biller & Gunes, 2010).

4.2. Métodos de Inferência Estatística: Testes de Hipótese

De modo a realizar os dois objetivos enunciados recorrer-se-á à estatística, mais concretamente aos métodos de inferência estatística, essenciais quando os dados recolhidos respeitam apenas a um subconjunto da população em estudo.

Uma população é um conjunto de unidades com características comuns (conjunto dos tempos de processamento de um modelo em determinada operação). Para conhecer o seu comportamento é necessário saber a sua distribuição e o valor dos respetivos parâmetros. No entanto, estes só são conhecidos caso seja possível estudar todos os elementos da população, facto que acarreta muitos custos, só possível em populações pouco numerosas. Uma alternativa é assim retirar uma amostra aleatória da população e estimar os seus parâmetros, inferindo da amostra para a população. Os métodos de inferência estatística consistem no cálculo de características da amostra a partir das quais se infere sobre os parâmetros da população (Reis, 2001). Estes métodos permitirão:

- 1) Estimar as características desconhecidas (parâmetros) de uma população;
- 2) Testar se determinadas hipóteses sobre características desconhecidas são plausíveis;

Consegue-se, com um certo grau de probabilidade, generalizar à população certas conclusões obtidas através dados amostrais (Reis, 2001). Zulema e Requeijo (2008) referem que a extrapolação de conclusões a partir da amostra para a população deve ser cautelosa, devendo associar-se às mesmas um nível de confiança, além de que a amostra deve ser aleatória de modo a representar verdadeiramente a população. Ainda segundo Reis (2001), a inferência estatística tem três grandes aplicações:

-Estimação pontual: Usa a informação obtida a partir da amostra para produzir um valor que é o melhor valor que se pode adiantar para certo parâmetro. É necessário conhecer a distribuição da população.

-Estimação por intervalos: Ao invés de indicar um valor concreto para certo parâmetro da população, é construído um intervalo que, com um grau de certeza, contenha o parâmetro. Também se deve conhecer a distribuição da população.

-Ensaio ou Testes de hipóteses: Métodos que possibilitam validar, ou não, determinadas afirmações sobre uma ou várias populações.

Devido ao desconhecimento das populações em estudo, e de modo a solucionar as duas questões previamente formuladas é indispensável aplicar vários testes de hipóteses. Sendo uma das aplicações mais relevantes da inferência estatística, estes métodos permitem ao investigador avaliar a veracidade ou credibilidade de uma determinada afirmação e muitos tipos de problemas na tomada de decisão, testes ou experiências no mundo da engenharia, podem ser formulados por estes métodos (Montgomery & Runger, 1999).

A hipótese a testar, denominada hipótese nula (H_0), deve conter uma igualdade e é considerada verdadeira até haver uma evidência estatística que a permita rejeitá-la. Nesse caso, a hipótese alternativa (H_1), que deve conter uma desigualdade, ganha validade (Z. Pereira & Requeijo, 2008). É importante frisar que as hipóteses são sempre afirmações sobre a população ou a distribuição em estudo, e não acerca da amostra.

Tal como em outros métodos de ajuda à tomada de decisão, existe sempre o risco de tomar a opção errada. Ao realizar um teste estatístico dois tipos de erros podem ser cometidos, o Erro de Tipo I (equação 4.1) que consiste em rejeitar a hipótese nula quando esta é verdadeira, e o Erro de Tipo II (equação 4.2), que ocorre quando se decide não rejeitar a hipótese nula sendo ela falsa (Z. Pereira & Requeijo, 2008):

$$\alpha = P(\text{Erro do Tipo I}) = P(\text{Rejeitar } H_0 | H_0 \text{ é verdadeira}) \quad (4.1)$$

$$\beta = P(\text{Erro do Tipo II}) = P(\text{Não rejeitar } H_0 | H_0 \text{ é falsa}) \quad (4.2)$$

A probabilidade de cometer o erro de tipo I, também chamada de nível de significância, é geralmente controlada pelo analista. Ao se controlar diretamente a probabilidade de rejeitar erradamente a hipótese nula, tende-se a tomar a rejeição de H_0 como uma forte conclusão. Por outro lado, a probabilidade do erro de tipo II, depende do valor verdadeiro da estatística e da dimensão da amostra selecionada, e por isso a aceitação de H_0 é vista como uma fraca conclusão. Em muitos casos, em vez de ser referido que se aceita H_0 , prefere-se referir que falhou a rejeição de H_0 , o que significa que não houve evidências estatísticas para rejeitar a hipótese nula (Montgomery & Runger, 1999).

Salienta-se ainda que, as duas probabilidades de erros estão relacionadas, o decréscimo do valor de um erro resulta sempre no aumento do valor do outro, desde que a dimensão da amostra não se altere. Atuar simultaneamente na redução dos dois erros pode ser feito aumentando a dimensão da amostra, ou seja recolhendo mais informação (Reis, 2001).

Outro conceito de referência é a potência de um teste estatístico, definida como a capacidade de um teste rejeitar H_0 quando é realmente falsa, ou seja, é a probabilidade de não cometer um erro de tipo II, sendo determinada por $1-\beta$. A potência de um teste é frequentemente utilizada para comparar diferentes testes estatísticos (Montgomery & Runger, 1999).

Existem atualmente uma panóplia de testes de hipóteses, e tendo em conta o tipo de dados obtidos e o propósito da análise deve ser selecionado o mais correto para cada situação (McCrum-Gardner, 2008). Segundo McCrum-Gardner (2008), o primeiro passo na escolha do teste mais apropriado é decidir que tipos de escala de medida têm os dados recolhidos e de seguida, qual é a análise pretendida. Existem quatro grandes grupos de escalas de medidas dos dados estatísticos, a saber: nominal, ordinal, por intervalos e de rácio. Os dados em estudo, os tempos de processamento, são definidos pela escala de rácios. Esta escala possui todas as características da escala ordinal e da escala por intervalos e adiciona a característica de ter um zero absoluto como valor mínimo (Reis, 2001).

A análise neste caso de estudo pretende, numa primeira fase, comparar grupos de duas ou mais amostras independentes, podendo ser utilizados com esse intuito testes paramétricos ou testes não paramétricos.

Os métodos paramétricos permitem extrapolar para uma população considerações acerca dos seus parâmetros, desde que sejam verificadas as suas condições de aplicabilidade (Reis, 2001). Na maioria dos procedimentos estatísticos, é requerida a avaliação do pressuposto de normalidade, sendo a estatística paramétrica um desses exemplos. Quando o pressuposto é violado, a interpretação e inferência podem não ser de confiança ou sequer válidas (Razali & Wah, 2011).

Já os métodos não paramétricos devem a sua designação ao facto de as entidades em estudo não serem os parâmetros de uma população e assim, não ser necessário especificar a distribuição de onde é proveniente da amostra, não tendo de obedecer por isso ao pressuposto da normalidade. São geralmente menos poderosos e flexíveis que os seus homólogos paramétricos, e por isso, desde que os pressupostos dos últimos sejam verificados, deve-lhes ser dada primazia (McCrum-Gardner, 2008), pelo que os testes não paramétricos são a alternativa aos testes paramétricos, quando estes não são aplicáveis (Reis, 2001).

Montgomery e Runger (1999) referem que o facto de os métodos não paramétricos não usarem toda a informação contida na amostra, torna-os menos eficientes em comparação com os seus homólogos paramétricos, o que se reflete no facto de precisarem de amostras de dimensão superior para atingirem a mesma potência que os métodos paramétricos. Contudo esta diferença de eficiência não é contundente, e quando distribuição subjacente não é aproximada à normal estes métodos são de uma grande utilidade. Estes autores salientam ainda que são procedimentos geralmente mais rápidos e simples de executar.

De forma a dar resposta ao primeiro objetivo, e estruturar os dados recolhidos da organização, será introduzida, no capítulo seguinte, uma metodologia para comparar os tempos de processamento dos diversos modelos, através de testes paramétricos ou não paramétricos, consoante as características das amostras a analisar.

4.3. Estruturação do Dados

Previamente a uma caracterização dos tempos de processamento através de distribuições estatísticas, é necessário estruturar os dados, determinando em que processos a duração da operação varia significativamente com o produto processado.

Cada conjunto de tempos de processamento de uma operação representa uma população. Para conhecer o seu comportamento, obtém-se amostras aleatórias da população para cada modelo, e realiza-se uma comparação entre as amostras recorrendo aos testes de hipóteses apropriados. O objetivo da comparação é verificar se as amostras podem ser consideradas provenientes da mesma população, ou seja, se o tempo de processamento de uma certa operação X, não varia consoante seja produzido o item A, B ou C.

Como referido anteriormente, para comparar grupos de duas ou mais amostras independentes pode-se optar por realizar testes paramétricos ou não paramétricos, estando a decisão dependente das amostras seguirem a distribuição normal. Assim, o primeiro passo do estudo consiste em realizar um teste de ajustamento à normalidade (Capítulo 4.3.1).

Consoante o seu resultado, e caso se confirme a normalidade dos dados, prossegue-se a análise com os métodos paramétricos realizando dois testes, de modo a comparar a média e a variância das amostras. Quando a normalidade não se verificar, recorre-se aos testes não paramétricos, que verificam se os grupos analisados são provenientes da mesma população (Capítulo 4.3.2). Em qualquer das situações, caso se rejeite a hipótese nula, ou seja, caso se verifique que as amostras em estudo diferem significativamente entre si, os dados não poderão ser agrupados e considera-se que os tempos de processamento de determinada operação variam significativamente consoante o modelo produzido. Essa conclusão implicará uma simulação diferenciada dos mesmos. Inversamente, quando não existirem evidências estatísticas que provem as diferenças nos modelos, os seus dados serão agrupados, e serão tratados na simulação como se de um modelo único se tratasse.

4.3.1. Teste da Normalidade

Apesar de muitos praticantes e livros de simulação empregarem a distribuição normal, frequentemente as fontes de aleatoriedade dos sistemas produtivos não seguem esta distribuição (Law, 2007). Desconhecendo-se a distribuição da população de onde as amostras foram obtidas, o primeiro passo da análise consiste em realizar um teste à normalidade, para verificar se a variável em estudo segue, ou não, a distribuição normal. Caso se confirme a normalidade pode-se prosseguir a análise recorrendo a testes paramétricos, caso contrário, apenas os testes não paramétricos são passíveis de ser aplicados.

Ainda que existam métodos práticos para aferir a normalidade, Requeijo e Zulema (2008) referem que são subjetivos, e aconselham a usar, quando possível, testes estatísticos objetivos, denominados testes de ajustamento à distribuição. Pretende-se saber se determinada amostra, pode ou não, ser proveniente de uma população com distribuição teórica “pré-fixada”(Reis, 2001). As hipóteses a considerar serão descritas pelas equações 4.3 e 4.4 seguintes:

$$H_0: \text{A população possui uma distribuição normal} \quad (4.3)$$

$$H_1: \text{A população não possui uma distribuição normal} \quad (4.4)$$

A aceitação ou rejeição da suposição de normalidade num certo grupo de dados tem tido um papel central em muitas áreas da investigação. Como consequência, foi realizado ao longo dos anos, um esforço no desenvolvimento, criação e aplicação dos testes de ajustamento à normalidade o que resultou num grande número de testes hoje disponíveis e múltiplas comparações da sua potência. Esta discussão ajuda hoje o analista a realizar a escolha adequada consoante cada situação específica (Razali, Shamsudin, Azid, Hadi, & Ismail, 2012; Romão, Delgado, & Costa, 2009).

Requeijo e Zulema (2008) referem que os testes mais aplicados na área da qualidade têm sido o do Qui-Quadrado e o de Kolmogorov-Smirnov. Mais recentemente Razali et al. (2012) mencionam que os testes mais comuns são o de Kolmogorov-Smirnov (KS), Anderson-Darling (AD), Lilliefors (LF) e Shapiro-Wilk (SW). São estes quatro testes que se encontram geralmente disponíveis nos *softwares* de estatística.

O teste do Qui-Quadrado (1900) e o teste de KS (1933) são antiquados e não devem ser utilizados para testar a normalidade (D'Agostino & Belanger, 1990). Segundo Reis (Reis, 2001) o teste de KS está desenhado partindo do pressuposto que a distribuição indicada na H_0 está completamente especificada, e quando se torna necessário recorrer à estimação dos seus parâmetros, o teste torna-se conservativo, isto é, tende a não rejeitar H_0 quando ela é falsa. Neste caso deve ser utilizada a correção proposta por *Lilliefors* (LF), e as tabelas modificadas que apresentou para o ajustamento à normal sem parâmetros especificados.

Entre as várias comparações realizadas, os autores têm referido que consoante a natureza da não-normalidade das amostras, difere a potência dos testes (Romão et al., 2009) ou que, perante a mesma amostra, diferentes testes podem produzir diferentes resultados (Razali & Wah, 2011). Contudo existe uma convergência entre diversas comparações concluindo que o teste de SW poderá ser a melhor e mais consistente opção para estudar a normalidade da amostra. Numa comparação entre os quatro testes anteriormente referidos, Razali e Wah (2011) concluem que o teste de SW é o mais poderoso para todos os tipos de distribuição e tamanhos de amostra, sendo o teste de AD o que mais se aproxima. Outra comparação, através do SPSS, comprova que este teste é o melhor e mais consistente a detetar a normalidade das variáveis em diferentes tamanhos de amostras (Razali et al., 2012).

Também Noughabi e Arghami (2010) e Romão et al. (2009) recomendam a utilização do teste de SW como um dos mais potentes para diferentes tipos de distribuições, em particular quando a natureza da não-normalidade é desconhecida (Romão et al., 2009), como é o caso.

Perante os referidos estudos, optou-se por realizar o teste de Shapiro-Wilk para testar a normalidade dos conjuntos de tempos de processamento. Para tal recorreu-se ao *software* SPSS. De notar que a maioria dos *softwares* contém o KS apesar de ter sido provado, em inúmeras comparações, que este teste é um dos menos potentes (Razali et al., 2012).

4.3.2. Teste de Comparação de Amostras independentes

O resultado do teste de Shapiro-Wilk determinará a aplicação de testes paramétricos, caso de confirme a hipótese nula, ou de testes não paramétricos caso as amostras não sigam a distribuição normal. Na tabela 4.1 constam os testes identificados, após a consulta de vários autores (McCrum-Gardner, 2008; Montgomery & Runger, 1999; Reis, 2001), que são passíveis de ser aplicados na comparação de grupos de amostras independentes (k).

Tabela 4.1: Teste de Hipóteses: comparação de 2 ou mais amostras independentes

	Testes Paramétricos		Testes Não Paramétricos
Escala de Medida	Intervalos/Rácios		Ordinal/Intervalos/Rácios
Comparação entre dois grupos	Média	Teste T	Teste <i>Mann-Whitney</i> ou Teste de KS
	Variância	Teste F	
Comparação entre k grupos	Média	ANOVA (Oneway)	Teste Kruskal-Wallis
		Teste de Scheffé	
		HSD Tukey	
	Variância	Teste de Bartlett	

Na aplicação dos testes paramétricos o objetivo é estudar as diferenças entre os parâmetros, média e variância, das diferentes populações. Considera-se que as amostras provêm da mesma população, caso não existam diferenças significativas entre a sua média e variância. Assim, e mesmo que no teste à diferença de variâncias se afirme que as amostras não diferem significativamente, é obrigatório realizar o teste à média.

O teste adequado é selecionado consoante o parâmetro e do número de amostras (k) a estudar. Como o teste de comparação da média têm como pressuposto que as amostras são retiradas de populações normalmente distribuídas com iguais variâncias, é realizado em primeiro lugar o teste à diferença de variâncias como (ver figura 4.2).

Para realizar a comparação das variâncias de duas populações normais das quais se extraíram duas amostras independentes é realizado o teste F, cujas hipóteses a considerar são descritas pelas equações 4.5 e 4.6:

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \quad (4.5)$$

$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \quad (4.6)$$

A não rejeição da hipótese nula permite avançar para a comparação de médias, caso contrário considera-se que existem diferenças significativas na variância das amostras, e por isso na variância das populações, inferindo-se da amostra para a população. Consequentemente conclui-se que modelo é decisivo para a duração da operação.

Para comparar a média de duas populações, e tendo em conta que as variâncias são iguais mas desconhecidas, realiza-se o popular teste t. Pretendendo-se validar a afirmação de que não existem diferenças na média dos tempos de processamento de dois modelos teremos:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = 0 \quad (4.7)$$

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq 0 \quad (4.8)$$

A rejeição de H_0 implica que as médias das populações não sejam consideradas semelhantes e por isso, nessa operação, os modelos são tratados de forma diferenciada. Caso contrário, a aceitação da hipótese nula permite afirmar que não existem diferenças significativas entre os tempos de processamento dos modelos e por isso podem ser agrupados.

Quando se pretender relacionar mais de duas amostras (por exemplo quando se têm três modelos referentes a um certo produto e se pretende comparar os seus tempos de processamento), não é exequível realizar vários testes individuais, comparando as amostras duas a duas, pois além do elevado número de testes a realizar, a probabilidade de cometer o erro de tipo I seria elevada e por isso inaceitável (Reis, 2001).

Assim, deve-se optar por métodos alternativos como a aplicação da ANOVA (análise de variância), que na sua forma simples, é uma generalização para mais de dois grupos do teste t para igualdade de médias, ou recorrer a testes de comparação múltipla. As duas escolhas obedecerão a dois pressupostos básicos (Reis, 2001):

- 1) Os conjuntos de observações para os k grupos constituem amostras aleatórias independentes entre si.
- 2) As k amostras são retiradas de populações normalmente distribuídas com iguais variâncias.

De forma a verificar a segunda condição, é necessário realizar um teste para a igualdade de variância entre k grupos populacionais com as hipóteses dadas pelas equações 4.9 e 4.10:

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2 \quad (4.9)$$

$$H_1 : \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2 \text{ com } i \neq j \quad (4.10)$$

Segundo Reis (2001), o teste de Bartlett permitirá investigar o nível de significância das diferenças entre as variâncias das k populações. A não rejeição de H_0 permite avançar para a comparação de médias, caso contrário, e como é visível na figura 4.2, os tempos de processamento serão considerados significativamente diferentes.

Cumpridos os dois pressupostos enunciados, poderão ser selecionados testes de comparação múltipla, em detrimento da ANOVA, por forma a dar resposta à comparação entre k grupos. A justificação da escolha está relacionada com o facto da ANOVA apenas indicar se existem ou não diferenças significativas entre os grupos analisados, e não especificar que grupo, ou entre que grupos existem essas diferenças. Por conseguinte, poderá se optar por um teste que permita a comparação múltipla entre cada par de médias, sendo os mais utilizados, o teste HSD de *Tukey* e o teste de *Scheffé*. Reis (2001) dá preferência ao teste de *Scheffé* pela sua simplicidade de cálculo, por ser robusto no que diz respeito aos dois pressupostos e por permitir a utilização de amostras com diferentes dimensões. Esta autora ressalva no entanto que para amostras de idêntica dimensão, o teste HSD de *Tukey* será mais preciso. As equações 4.11 e 4.12 contêm as hipóteses a considerar no teste de *Scheffé*.

$$H_0 : \mu_i = \mu_j \quad (4.11)$$

$$H_1 : \mu_i^2 \neq \mu_j^2 \quad (4.12)$$

Se o teste confirmar que as amostras provêm de populações iguais na sua média, e sabendo que também possuem iguais variâncias, os dados serão agrupados, concluindo-se que a duração da operação não dependerá do modelo produzido. Pelo contrário, se as médias das variáveis estudadas forem significativamente diferentes entre si, os tempos de processamento desses modelos serão modelados de forma separada.

Quando as amostras analisadas pertencem a populações que não seguem a distribuição normal, i.e. quando no teste de SW é rejeitada H_0 , a solução passará por recorrer a métodos não paramétricos. Neste tipo de testes não serão realizadas comparações de médias ou variâncias, o que se testará é se a forma da distribuição será a mesma para todas as amostras. Genericamente, as hipóteses a testar serão (Reis, 2001):

H_0 : As diferentes amostras são provenientes de populações com a mesma distribuição.

H_1 : Pelo menos uma das amostras é proveniente de uma população com distribuição diferente das restantes.

Tal como nos métodos paramétricos, o teste a utilizar difere consoante o número de conjuntos de tempos de processamento (populações) a comparar. Para testar a igualdade de distribuições em duas amostras, Reis (2001) apresenta dois testes, o de Mann-Whitney e o Kolmogorov-Smirnov, enquanto Montgomery e Runger (1999) e McCrum-Gardner (2008) apenas referem o teste de Mann-Whitney, que é considerado a alternativa não paramétrica ao teste t para a diferença de médias e será assim preferencialmente aplicado nesta análise.

Por último, para testar a igualdade de k amostras independentes será realizado o teste de Kruskal-Wallis que é uma generalização, para $k > 2$ do teste de Mann-Whitney, sendo este método usualmente considerado a alternativa não paramétrica à análise de variância simples (Reis, 2001).

Em ambos os testes, se a afirmação colocada em hipótese não for rejeitada, considera-se que não há evidência estatística que permita concluir que as amostras são provenientes de populações com distribuições diferentes, e por isso, que os tempos de processamento poderão ser agrupados.

Pelo contrário, a rejeição da hipótese nula permitirá confirmar que os tempos de processamento são influenciados pelo modelo produzido e consequentemente não poderão ser agrupados no ajustamento a uma distribuição de probabilidade.

De salientar que quando for rejeitada H_0 no teste de Kruskal-Wallis, para determinar que grupos de tempos de processamento diferem entre si, será necessário realizar o teste de Mann-Whitney comparando cada par de grupos. O *software* SPSS permitirá a comparação através de uma variação do teste de Kruskal-Wallis.

Na figura 4.2 encontra-se sistematizada a metodologia proposta para a análise dos dados a introduzir no modelo de simulação. Após a realização dos testes de comparação dos grupos de tempos de processamento, avança-se para a próxima fase da análise, que consiste em determinar as distribuições estatísticas que melhor representem cada conjunto de dados e quais os seus parâmetros, de modo a dar resposta ao segundo objetivo da análise e introduzir no modelo a variabilidade presente no sistema.

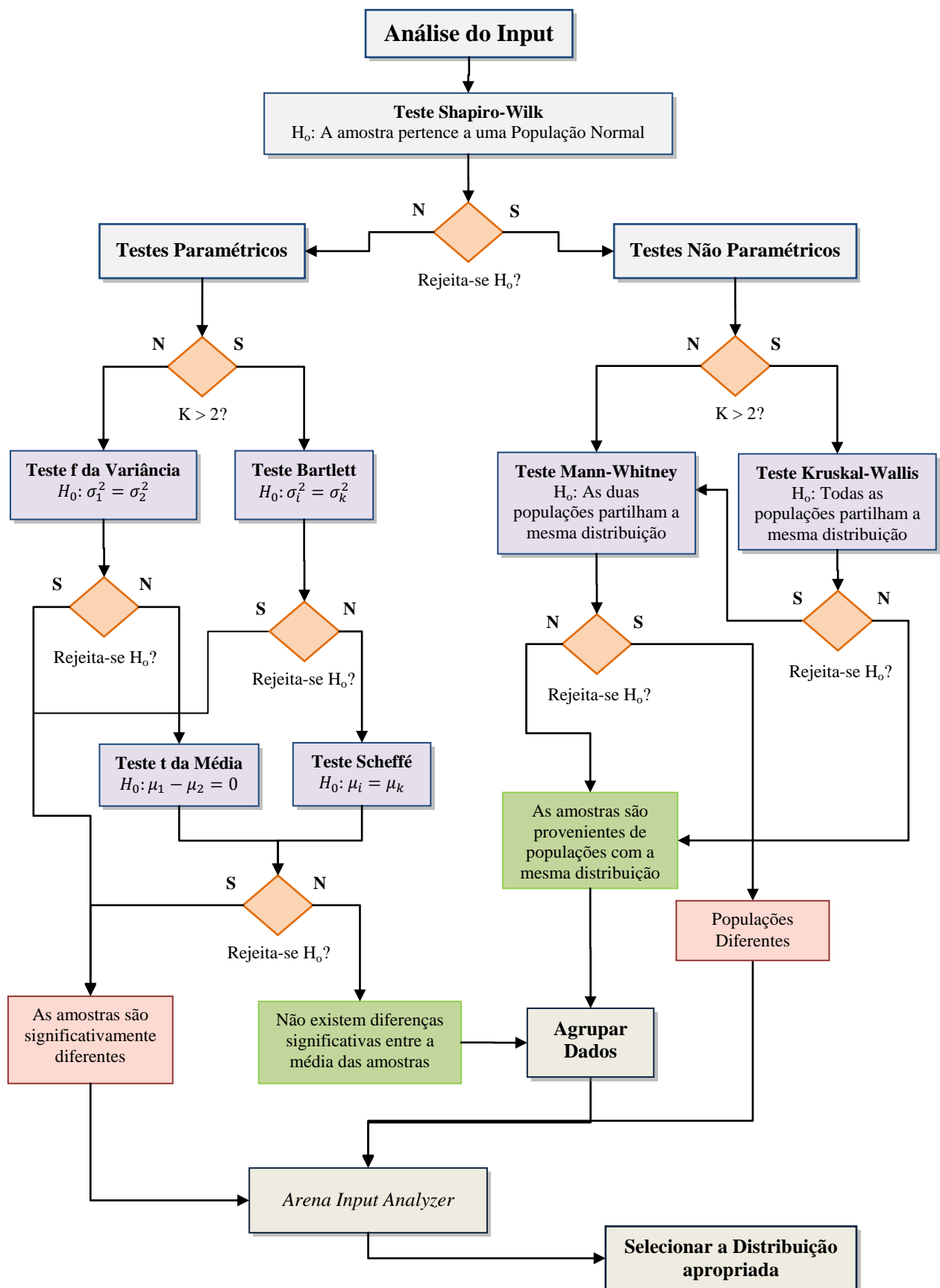


Figura 4.2: Metodologia proposta para a análise do *input* no modelo de simulação

[Adaptado de: Lucas and Tenera (2014): p.7]

4.4. Ajustamento a uma Distribuição de Probabilidade

Na presença de um historial de informação do sistema, ou quando são recolhidos dados da variável aleatória em estudo, o analista tem de decidir como incorporar os dados no modelo, se usa a informação diretamente no modelo de simulação ou se opta por ajustar uma distribuição de probabilidade aos dados. Ambas as opções contêm vantagens e desvantagens. Se por um lado o uso do histórico de dados não permite experimentar outros valores que não os existentes, por outro, ao ajustar determinada amostra a uma distribuição estatística é possível resultarem valores impossíveis de acontecerem no sistema real (provenientes das caudas das distribuições ilimitadas). Contudo, o histórico de informação raramente é suficiente para realizar o número de replicações desejadas além de limitar a sua duração, e tornar mais lentas as corridas de simulação (Kelton et al., 2002). A modelação das fontes de variação do sistema através de distribuições estatísticas constitui assim uma parte importante de um sólido estudo de simulação (Law, 2012).

A definição de uma distribuição estatística para um conjunto de dados pode ser efetuada empiricamente, ou através de técnicas de inferência estatística, que consistem no ajustamento de várias distribuições teóricas aos dados, determinando qual a distribuição que fornece a melhor aproximação aos mesmos. Segundo Law (2012), na abordagem empírica, apenas o intervalo de dados observado pode ser gerado no modelo, o que é problemático no caso de as amostras serem pequenas. Desde que seja encontrada uma distribuição teórica que represente bem os dados, deve ser dada preferência aos métodos de inferência estatística.

Por conseguinte, na segunda parte da análise pretende-se selecionar a distribuição que melhor represente cada conjunto de tempos de processamento. O processo de seleção da distribuição é hoje uma ferramenta importante para as organizações lidarem com os riscos e as incertezas presentes nos seus processos. Na maioria dos casos, nenhuma das distribuições ajustadas estará exatamente correta, o objetivo é determinar a distribuição que é suficientemente precisa para os propósitos do modelo (Law, 2012). As distribuições estatísticas vão permitir que o *input* no *software* traduza o melhor possível, as fontes de variação que ocorrem nos tempos de processamento.

Quando existem dados disponíveis, tanto Biller e Gunes (2010) como Law (2012) indicam três etapas para especificar uma distribuição teórica que represente os dados:

- 1) Selecionar as famílias de distribuições de probabilidade apropriadas tendo em conta as características do processo e a sua forma de representar os dados. As estatísticas descritivas também podem dar boas indicações.
- 2) Estimar os parâmetros da distribuição.
- 3) Testar o ajustamento das distribuições por via dos testes de hipótese ou análise gráfica.

Desenvolver estes procedimentos pode ser difícil, consumir muito tempo e ser propenso a erros (Law, 2007), além de que em muitos casos é complicado ajustar os dados observados a distribuições estatísticas menos comuns. Por estas razões, a maioria das aplicações são realizadas através de *softwares* que automaticamente determinam qual a distribuição que melhor se ajusta aos dados. Dois programas utilizados frequentemente com este propósito são o *Arena Input Analyzer* e o *Expert Fit* (Chung, 2003). Um elemento diferenciador destes programas é o facto de a distribuição seleccionada ser colocada no formato adequado para a sua introdução diretamente no *software* de simulação. Como se vai empregar o *Arena* para desenvolver a simulação da linha de produção, recorreu-se a uma das suas ferramentas, o *Arena Input Analyzer* para determinar a distribuição que melhor representa os dados recolhidos e os seus parâmetros.

Previamente à utilização do referido programa, é no entanto necessário seleccionar as distribuições de probabilidades indicadas para estudar a variável em estudo, neste caso, os tempos de processamento, uma variável contínua positiva. O *Arena* disponibiliza as seguintes distribuições de probabilidade contínuas: Weibull, Uniforme, Exponencial, Gamma, Normal, Lognormal, Beta, Triangular, Erlang e Jonhson.

Dentro destas, Kelton et al. (2002) e Law (2007) são unânimes ao referir quatro distribuição apropriadas para estudar a duração das operações, a saber: Gamma, Weibull, Lognormal e Erlang. É relevante mencionar que as quatro distribuições são definidas em intervalos não negativos, i.e. $[0, +\infty]$. Já a distribuição Normal, embora amplamente aplicada, não deve ser utilizada no estudo de variáveis positivas, como a duração das operações, devido ao seu intervalo ser de $+\infty$ a $-\infty$.

Após a seleção das distribuições de probabilidade mais indicadas para o estudo dos tempos de processamento, o passo seguinte será recorrer a testes de hipóteses, disponíveis nos programas anteriormente referidos, que determinam qual a distribuição que fornece o melhor ajustamento. Desconhecida a distribuição subjacente à população em análise, o objetivo destes testes, denominados testes de ajustamento, é estudar a hipótese (H_0) de que determinada distribuição irá satisfazer como modelo da população (Montgomery & Runger, 1999). A figura 4.3 sintetiza a metodologia seguida para o ajustamento das distribuições de probabilidade a cada conjunto de dados (segundo objetivo da análise do *input* no modelo), após a sua estruturação pelos métodos de inferência estatística mencionados anteriormente.

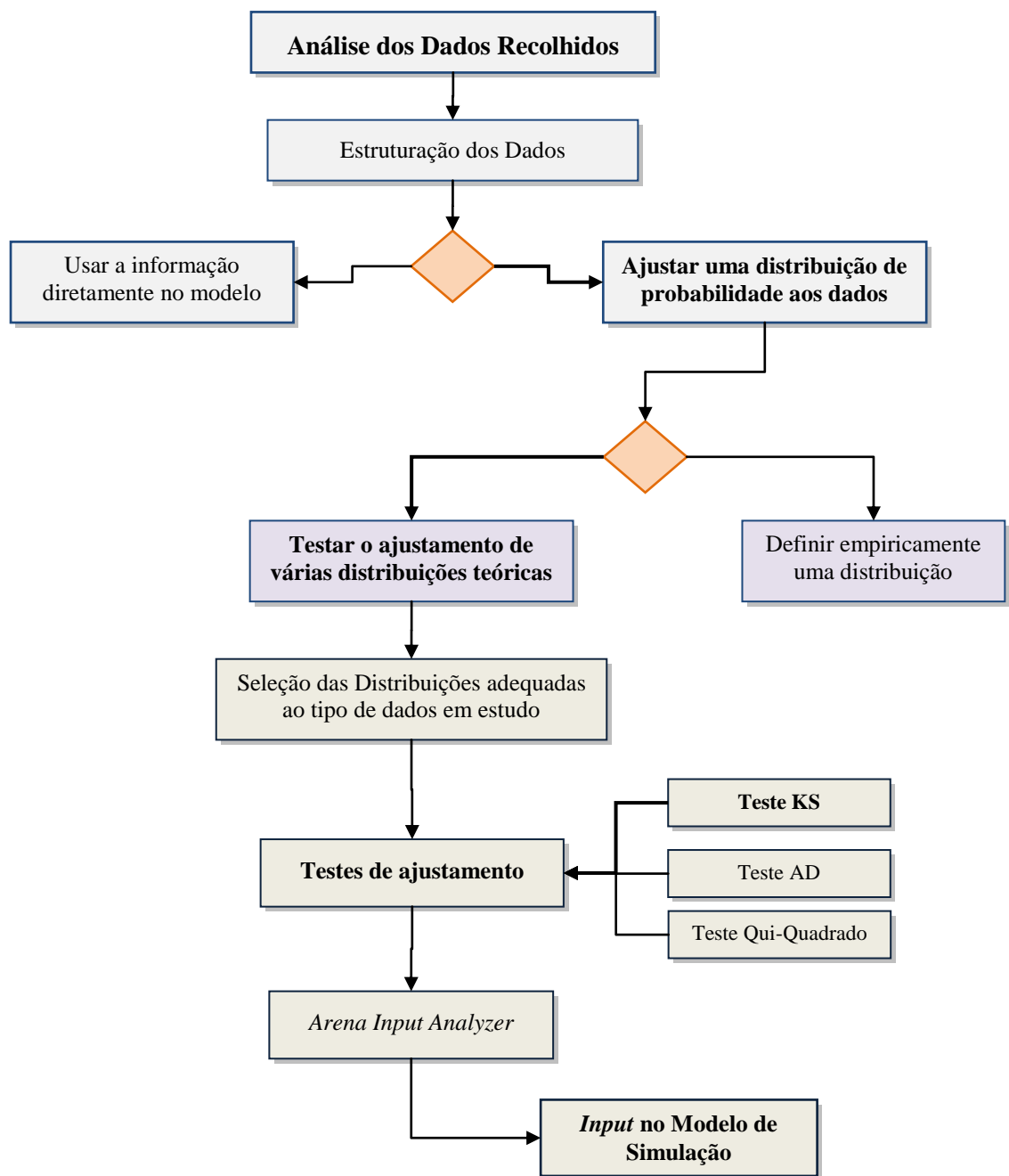


Figura 4.3: Metodologia adotada na segunda parte da análise do *input* no modelo

Segundo Reis (2001), o problema dos testes de ajustamento, também designados testes da bondade do ajustamento, pode ser descrito da seguinte forma:

Dada uma amostra aleatória retirada de uma população X , e uma certa função de probabilidade teórica $f_o(x)$ pretende-se saber se a amostra pode ser considerada como proveniente de uma população com tal distribuição, isto é:

H_0 : A função de probabilidade de X é $f_o(x)$

H_1 : A função de probabilidade de X não é $f_o(x)$

Tradicionalmente rejeita-se H_0 , se o *p-value* for menor ou igual ao nível de significância (α) especificado, geralmente 0,05. O *p-value* é um valor entre zero e um, que significa o menor valor de α que conduza à rejeição da hipótese nula para os dados em estudo (Montgomery & Runger, 1999). Assim, quanto maior o *p-value* que corresponde ao teste estatístico, melhor o ajustamento à distribuição e inversamente, valores do *p-value* menores que 0,05 (estipulando $\alpha=0,05$) indicam que a distribuição não se ajusta aos dados. Tal como nos anteriores procedimentos estatísticos, um valor elevado de *p-value* não constitui uma prova de um bom ajustamento, apenas indica que não existe evidência estatística para rejeitar o ajustamento a determinada distribuição.

Este tipo de testes também ajuda à decisão entre optar por distribuições empíricas ou teóricas, sendo os seus resultados bons indicadores. Caso o *p-value* para uma ou mais distribuições sejam razoavelmente elevados (maiores ou iguais a 0,10) pode-se utilizar uma distribuição teórica com elevado grau de confiança de que se obtém uma boa representação dos dados. Caso contrário aconselha-se a opção por uma distribuição empírica de modo a captar de forma mais eficaz as características dos dados (Kelton et al., 2002).

Na literatura atual existem inúmeros testes de ajustamento, evoluções dos mesmos, e diversas comparações. Segundo Kelton et al. (2002) não existem abordagens universalmente aceites na determinação da distribuição indicada, sendo que diferentes testes estatísticos podem posicionar as distribuições de diferente forma. A maioria dos *softwares* que aplicam estes métodos contém os testes de Qui-Quadrado, Kolmogorov-Smirnov (KS) e o de Anderson-Darling (AD), sendo nestes testes que se concentra esta análise (Fig. 4.3). Já o teste de Shapiro-Wilk, anteriormente referido, é especialmente utilizado para testar a normalidade.

O Teste do Qui-Quadrado é o mais antigo e pode ser considerado como uma comparação mais formal entre o histograma resultante dos dados e a densidade da distribuição ajustada. Na aplicação deste método, a primeira ação consiste em dividir toda a gama de valores da distribuição ajustada em k intervalos adjacentes, ou classes. No entanto, a falta de uma clara prescrição sobre o número de intervalos a seleccionar e o seu tamanho é uma grande desvantagem. Segundo Law (2007) com as mesmas amostras, e dependendo do número de intervalos escolhidos, alcançam-se conclusões completamente diferentes, especialmente no caso de variáveis contínuas.

Devido à informação perdida na agregação em classes do Qui-Quadrado, Reis (2001) indica que não é aconselhável a utilização deste teste no ajustamento de distribuições contínuas, indicando para esse caso o teste de KS. Entre as diversas classes de testes de ajustamento que têm sido desenvolvidas, uma das mais importantes é baseada na discrepância entre a função de distribuição empírica $F_n(x)$ e a função de distribuição em hipótese $F_0(x)$, sendo os mais conhecidos o teste de KS e o de AD. Estes métodos são usados para medir a “proximidade” da amostra relativamente à distribuição nula (Zhao,

Xu, & Ding, 2010) e tendem a ser mais potentes que o Qui-Quadrado contra várias distribuições alternativas (Arnold & Emerson, 2011; Law, 2007).

Uma possível desvantagem do KS em relação ao AD é o facto de atribuir o mesmo peso a todas as diferenças entre a distribuição empírica e a distribuição ajustada, ao passo que muitas distribuições relevantes diferem essencialmente nas suas caudas. Por sua vez, o teste de AD é concebido para detetar discrepâncias nas caudas (Law, 2007).

Entre as diversas comparações consultadas, Arnold e Emerson (2011) mencionam que o teste de KS é o mais popular embora o teste de Cramér-von Mises e as adaptações propostas por Anderson-Darling e por Watson se mostrem mais potentes contra uma larga classe de distribuições alternativas. Já Steele e Chaseling (2006) ao confrontarem a potência de vários testes estatísticos concluíram que nenhum dos testes existentes na literatura pode ser recomendado como o melhor teste estatístico. Mais recentemente, Fisher e Kamps (2013) compararam cinco testes de ajustamento (AD, KS, Watson, Cramér-von Mises e Neyman) referindo que embora a potência do teste varie consoante diferem os parâmetros da distribuição, no caso de recomendarem apenas um teste, provavelmente o teste de AD é a melhor escolha pois é o mais poderoso em várias situações e é sempre competitivo nas situações em que não é o melhor.

Perante o exposto, e não existindo nenhum teste mais potente que os restantes contra cada uma das distribuições alternativas, considerou-se que o teste de Anderson-Darling é o mais indicado para estudar o ajustamento dos dados a uma das quatro distribuições de probabilidade. No entanto, o *Arena Input Analyzer* não contém este teste, sendo este um ponto desfavorável na sua utilização. Como este programa apenas fornece os testes do Qui-Quadrado e KS, optou-se nesta análise por aplicar o segundo, devido às desvantagens anteriormente apontadas ao primeiro.

5. Caso de Estudo

As quatro fases da metodologia de estudo apresentada serão aplicadas neste capítulo, após uma breve apresentação da organização na qual o caso de estudo se baseou e da qual se recolheram os dados que permitiram fazer a análise de variabilidade numa primeira fase, e o modelo de simulação numa segunda fase. Por último será analisada a aplicação dos conceitos da TOC à linha de produção em questão.

5.1. Introdução do Caso de Estudo

5.1.1. Apresentação da Organização

A Fábrica de Transformadores do Sabugo pertence à Siemens AG, conhecida multinacional que está presente em 190 países, e que atualmente contém quatro grandes áreas de negócio, a saber: Infraestruturas e Cidades, Saúde, Indústria e Energia. A organização tem como visão proporcionar as respostas aos grandes desafios do nosso tempo, tais como as alterações climáticas, a crescente urbanização, as mudanças na demografia ou a globalização.

Em Portugal, a Siemens possui duas unidades de produção, a Fábrica de Corroios e a Fábrica do Sabugo, além de dez centros de competência e inúmeras parcerias com universidades, instituições de ensino superior e centros de pesquisa, que empregaram 2476 colaboradores em 2013. A Fábrica de Transformadores do Sabugo (FS), fundada no ano de 1959, insere-se no sector energético da organização, líder mundial no fornecimento de produtos, serviços e soluções para a produção de energia. Na FS são produzidos transformadores imersos em óleo para múltiplas aplicações, sendo atualmente a maioria da sua produção destinada à exportação para países como Argélia, Angola, Emirados Árabes Unidos, Alemanha, entre outros ([https://extranet.siemens.pt/cmc/relatorio_e_contas/apresentacoes_siemens_SA/portugues/Siemens Po rtugal_12-13.pdf](https://extranet.siemens.pt/cmc/relatorio_e_contas/apresentacoes_siemens_SA/portugues/Siemens_Po rtugal_12-13.pdf) em 20/02/2014).

Entre os seus produtos e soluções podem-se mencionar os transformadores de distribuição, transformadores de potência, transformadores para subestações móveis, transformadores para parques eólicos (SILFOS), contendo a fábrica também um laboratório de materiais (https://www.swe.siemens.com/portugal/web_nwa/pt/Sabugo/produtos-solucoes/Pages/default.aspx em 20/02/2014).

Nos últimos anos, foi desenvolvido entre as fábricas de Portugal, Colômbia, Brasil e Paquistão o conceito LDT (*Large Distribution Transformer*), sendo a dissertação centrada neste produto (Fig. 5.1). A tecnologia LDT permite fabricar transformadores de média dimensão mais competitivos no preço e no prazo de entrega.



Figura 5.1: LDT - Large Distribution Transformer

(Fonte: https://www.swe.siemens.com/portugal/web_nwa/pt/Sabugo/Documents/Large_Distribution_Transformer_EN.pdf em 27/01/14).

Estes transformadores trifásicos oferecem o melhor de dois mundos: o desempenho de um transformador de potência com a simplicidade, racionalização de custos e dimensões dos transformadores de distribuição.

5.1.2. Definição do Sistema e Produto

Devido à crescente procura direcionada ao produto LDT, a FS pretende com este projeto simular a configuração da sua linha de produção para o fabrico exclusivo destes transformadores. No âmbito deste trabalho, o LDT foi definido com uma gama de potência entre 2,1 e 40 MVA, e com uma tensão máxima de 72,5 KV. Dentro desta gama de potência e tensão a fábrica pode produzir 14 modelos, sendo que para o presente estudo de simulação apenas foi considerada a produção de 5 destes modelos, porque é nestes que incide a procura para o próximo ano. As suas características estão explicitadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Características dos LDT em estudo

Modelo	Bobinagem	Comutador	Potência (MVA) de a		Tensão (KV)
7	V3	Vazio	10,1	20	$\leq 72,5$
9	V1	Vazio	10,1	20	$\leq 72,5$
10	V1	Carga	10,1	20	$\leq 72,5$
32	V2	Vazio	3	25	$\leq 51,9$
33	V2	Carga	3	25	$\leq 72,5$

Os LDT são transformadores trifásicos com núcleos de três colunas (Perna U, V e W), e três enrolamentos BT (Baixa-Tensão), AT (Alta-Tensão) e Regulação (REG), concêntricos em cada uma das três bobinas (Fig. 5.2) do transformador. O enrolamento de regulação é frequentemente efetuado na última camada do enrolamento AT.

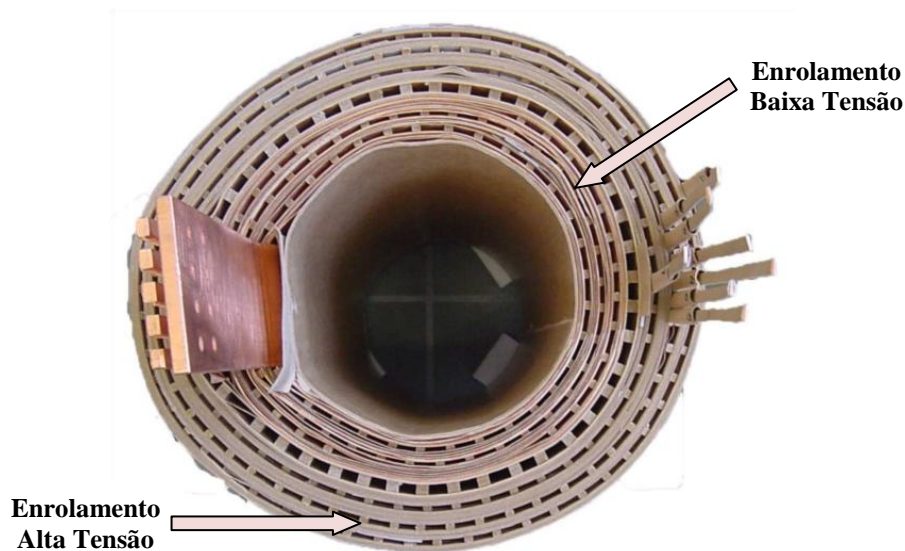


Figura 5.2: Bobine (vista superior)

Um resumo do fluxo de material na linha é sintetizado na figura 5.3. A linha de produção da FS pode ser dividida em quatro grandes áreas, bobinagem, montagem, tratamento e tinas. O processo de fabrico inicia-se com a preparação dos moldes para cada um dos enrolamentos do transformador. Após esta curta operação, os moldes são transportados para as máquinas de bobinagem onde é realizado o enrolamento. Esta operação, denominada bobinagem, pode demorar vários dias, dependendo da complexidade do enrolamento e do operador que trabalha com a máquina de bobinagem. Foram identificados seis tipos de enrolamento: camada, compacto, regulação, disco, *smith* e banda. Além dos vários tipos de enrolamentos, é nesta operação que são introduzidas muitas das especificações técnicas que caracterizam cada transformador, o que resulta numa enorme variabilidade na duração desta operação mesmo na bobinagem de enrolamentos para o mesmo modelo de LDT. Os 5 modelos referenciados podem ser agrupados em 3 conjuntos consoante a sua bobinagem:

- V1 ou Compactos (K): Nestes modelos os enrolamentos BT, AT e REG são bobinados uns em cima dos outros - Enrolamento Compacto - no mesmo molde. São assim apenas preparados três moldes, para as três bobinas do transformador.
- V2: Os modelos 32 e 33 tem um enrolamento BT em banda, sendo que a fábrica só possui uma máquina que efetua este tipo de enrolamento. O enrolamento BT precisa depois ser tratado num autoclave, e só posteriormente é realizado, por cima do Enrolamento BT, o Enrolamento AT e REG. Também só precisa de três moldes por transformador.

- V3: Nos restantes modelos, originalmente cada enrolamento (os 3 BT, 3 AT e 3 REG) era efetuado separadamente tendo que ser preparados nove moldes. Atualmente, a evolução ditou que frequentemente os enrolamentos REG são realizados em cima dos enrolamentos AT e assim, são preparados apenas 6 moldes o que se traduz no final da bobinagem em seis enrolamentos por transformador.

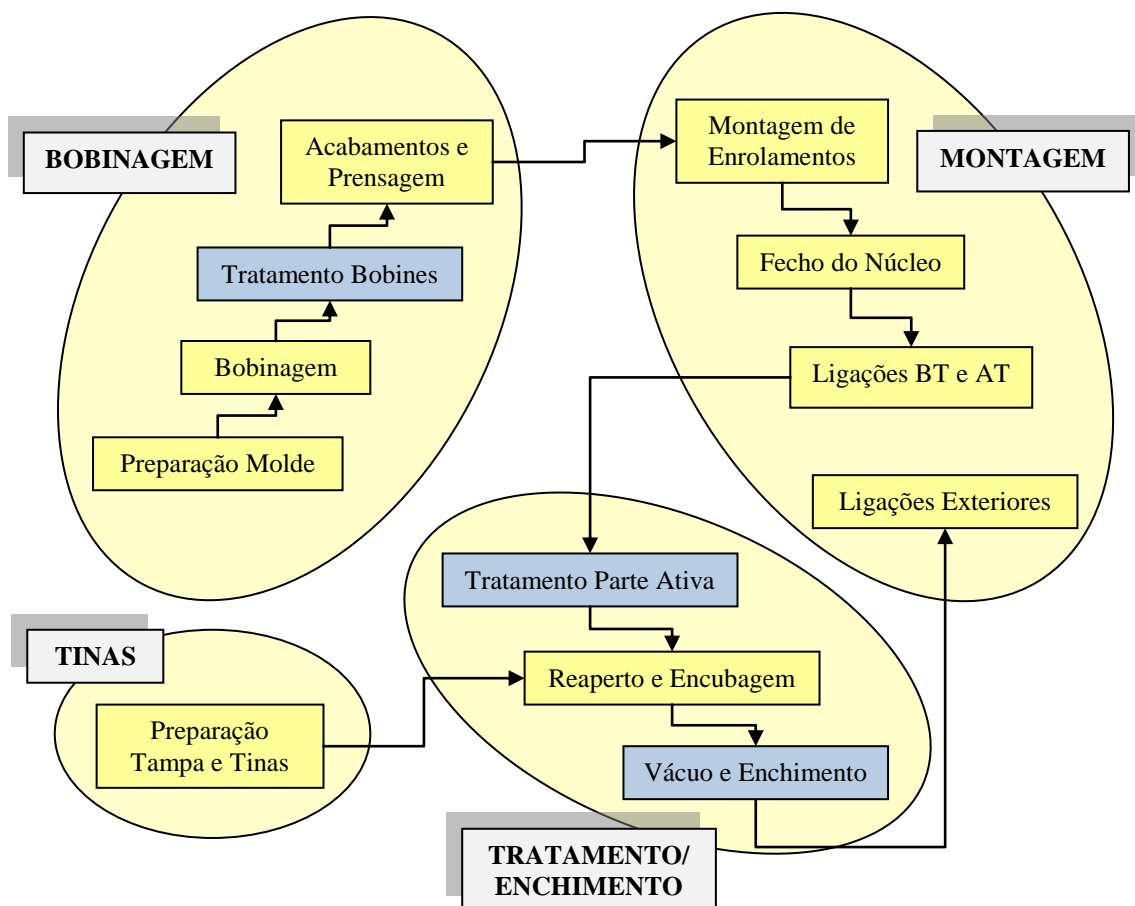


Figura 5.3: Descrição do fluxo de material na linha de produção

Após a bobinagem, e no caso dos modelos V1 e V3, os conjuntos de enrolamentos são encaminhados para um autoclave onde é realizado o seu tratamento, segundo um tempo pré-determinado que é estabelecido consoante as características do transformador. Nos modelos V2, e como foi acima referido, apenas o enrolamento BT vai ao autoclave. Ainda nesta fase são realizados acabamentos e apertos (prensagem) aos conjuntos de enrolamentos. A partir desta operação o fluxo produtivo de V1, V2 e V3 (Fig. 5.3) é idêntico.

Finda a fase da bobinagem, começa a ser montada a parte ativa do transformador, composta por diversos componentes tais como núcleo, bobines, comutador, longarinas, ligações, travessias, etc. Esta montagem é realizada num posto de trabalho (denominado Box) e engloba um conjunto de atividades que podem ser agrupadas em quatro grandes operações. A primeira consiste na montagem dos

enrolamentos no núcleo do transformador, como demonstra a figura 5.4. As restantes operações são: o fecho do núcleo, ligações BT e ligações AT. Cada uma das operações de montagem é realizada por uma equipa de dois operadores, sendo que o grupo de equipas presente nesta área tem flexibilidade para realizar qualquer uma das quatro operações. De referir ainda que as ligações AT e BT podem ser efetuadas em paralelo.



Figura 5.4: Montagem dos enrolamentos

(Fonte: <http://www.siemens.co.ao/pool/events/connect-to-siemens-angola/transformadores.pdf> em 28/01/2014)

É na última operação (ligações AT) que é montado o Comutador, em carga ou vazio, sendo esta uma característica diferenciadora entre cada par de modelos da tabela 5.1.

Efetuada a montagem, a parte ativa do transformador é transportada para um autoclave, denominado *Vaporphase*, que é próprio para o tratamento de partes ativas. O tempo que o produto fica no autoclave é tabelado e está relacionado com a potência do transformador, sendo que o autoclave não pode ser aberto enquanto durar o tratamento. O *Vaporphase* tem capacidade para processar três partes ativas simultaneamente.

Enquanto decorre a montagem da parte ativa e o seu tratamento, é realizada na área das tinas a preparação da tina e da tampa do transformador, operações que também requerem uma equipa de dois operadores. A tina de cada transformador tem que estar preparada antes de a correspondente parte ativa sair do *Vaporphase*.

Como depois do tratamento várias peças da parte ativa ficam desapertadas, é efetuada a operação de reaperto da parte ativa e de seguida a encubagem, onde a parte ativa do transformador é inserida dentro da tina. Como a parte ativa do transformador, depois do tratamento, deve estar o mínimo de tempo exposta ao ar livre, o reaperto é efetuado sempre de manhã para a encubagem ser efetuada ainda no mesmo dia. Cada operação requer duas equipas de dois operadores.

Ainda na área de tratamento é de seguida realizado vácuo e o enchimento com óleo, enquanto se inicia a última operação da linha de produção, as ligações exteriores. Esta operação, que requer um operador

por transformador, começa a ser realizada ainda na área de preparação de tintas (75% da sua duração) e é concluída depois do reaperto e encubagem.

No processo de fabrico dos LDT, ilustrado na figura 5.3, estão representadas a azul as únicas três operações que não requerem operadores. O facto de a linha de produção ser caracterizada por muitos processos manuais aufere-lhe elevada variabilidade sendo a duração das operações alvo de estudo no capítulo seguinte.

5.2. Análise dos Dados Recolhidos

Após a definição do sistema e do produto, a aplicação do caso de estudo prosseguiu com a recolha dos tempos de processamento através de uma observação direta do sistema, para sua posterior análise. A complexidade do sistema produtivo, o facto de as suas operações poderem prolongar-se por vários turnos consecutivos, aliada à variabilidade na sua duração consoante o modelo produzido, impossibilitou a recolha de um número de dados suficientes através da observação direta. Na verdade, para recolher amostras da duração de cada operação de todos os modelos em estudo, seriam necessários muitos meses.

Assim, de modo a obter a quantidade de dados necessária para a especificação de uma distribuição de probabilidade para cada conjunto de tempos de processamento, optou-se por recorrer ao histórico dos últimos 5 anos da organização, disponível através de uma fonte informática, o sistema SAP.

Não obstante, de modo a validar os dados retirados da fonte informática, foi efetuada uma comparação com os dados recolhidos diretamente do sistema. Juntamente com os responsáveis do projeto também foram eliminados dados que correspondiam a erros na introdução dos tempos de processamento no sistema SAP. De referir que não foi realizada uma análise objetiva de *outliers* porque é intenção da organização manter a informação referente a toda variabilidade existente nos seus processos.

Para comparar os dados recolhidos do sistema com a fonte informática, foram observadas as atividades de montagem de um modelo compacto (V1) e compilada a tabela 5.2. As amostras recolhidas foram depois comparadas com os tempos médios retirados da fonte informática, para as mesmas operações e referentes ao mesmo modelo (tabela 5.3).

As diferenças encontradas entre os tempos observados e os tempos retirados da fonte informática foram consideradas normais, tendo em conta a variabilidade presente nestas operações. A comparação serviu assim para validar os tempos recolhidos do SAP e permitiu avançar para a especificação dos *inputs* do modelo de simulação.

Tabela 5.2: Recolha de tempos diretamente do sistema

Montagem Compacto	Tempo (min)
Preparar Grades + Retirar e Arrumar Long. Superior	111
Retirar e Arrumar Fecho	127
Retirar Longarina Inf. + Colagem Núcleo	20
Colocar Mesas inferiores	180
Transporte e Montagem 1ª Bobine	493
Transporte e Montagem 2ª Bobine	215
Transporte e Montagem 3ª Bobine	100
Cravação e acerto	273
Colocação de meses superiores e discos	120
Montagem Enrolamentos	1639
Transporte e Montagem Longarina Sup.	65
Transporte e Montar Fecho	960
Arrumar Grades + Transporte Longarina Inf. e Macacos	36
Montagem de Longarinas +Aperto Fecho	240
Aperto de enrolamento com macacos + Medições	59
Fecho	1360
Ligações BT	1440
Preparar e Montar Comutador e Ligações AT	2400
Ligações	3840

Tabela 5.3: Comparação dos dados recolhidos com a fonte informática

Operação	Tempos observados (h)	Tempos médios SAP (h)
Montagem Enrolamentos	27,3	28,9
Fecho	22,7	19
Ligações BT e AT	64,0	61,7

A fase seguinte consiste em analisar a informação recolhida e caracterizar a variabilidade presente no sistema, para sua posterior introdução no modelo de simulação, dando resposta aos dois objetivos anteriormente definidos (Cap. 4.1). Como referido, a simulação requer modelos simplificados mas que representem corretamente a realidade, o que conduziu a uma estruturação dos dados recolhidos, calculando em que processos a duração da operação varia significativamente com o produto processado através da metodologia exposta (ver figura 4.2).

Na tabela 5.4 estão representados os conjuntos de amostras obtidos da fonte informática. Para avaliar o agrupamento dos dados, serão comparadas todas as operações dos modelos 7, 9 e 10, excluindo a sua bobinagem e aperto, que é substancialmente diferente (Cap. 5.1.2). Nos modelos V3, as quatro operações do modelo 32 serão comparadas com as do modelo 33. Nestes, além da sua bobinagem ser diferente, os tempos de processamento de toda a montagem são inseridos no SAP numa só operação (“Montagem”) o que não permite a sua comparação com os restantes modelos. Por último, não

existem informações na organização referentes a três operações dos modelos V3: ligações exteriores, preparação tina e tampa.

Tabela 5.4: Amostras recolhidas de tempos de processamento para cada modelo

Modelos 9 e 10 (V1)	Modelo 7 (V2)	Modelos 32 e 33 (V3)
Bobinagem V1	Bobinagem BT	Banda BT
Aperto V1	Bobinagem AT	Bobinagem AT V2
Montagem Enrolamento	Aperto BT	Montagem
Fecho Núcleo	Aperto AT	Reaperto
Ligações BT	Montagem Enrolamento	
Ligações AT	Fecho Núcleo	
Reaperto e Encubagem	Ligações BT	
Ligações Exteriores	Ligações AT	
Preparação Tina	Reaperto e Encubagem	
Preparação Tampa	Ligações Exteriores	
	Preparação Tina	
	Preparação Tampa	

Como sintetizado na figura 4.2 (Cap. 4.3.2), o processo de análise do *input* do modelo inicia-se com o Teste de Shapiro-Wilk, que avalia a normalidade das amostras. Para realizar os testes de hipóteses recorreu-se maioritariamente ao *software* informático SPSS, um precioso auxiliar no tratamento dos dados estatísticos. Contudo, o facto de alguns testes paramétricos (Teste F para variância, Teste *Bartlett*, Teste *Scheffé*) estarem indisponíveis no SPSS exigiu a utilização de outras aplicações, como o Excel. O nível de significância utilizado para rejeitar a hipótese nula foi de 5%.

Nas tabelas 5.5 e 5.6 apresentam-se os resultados obtidos da comparação das amostras recolhidas e das hipóteses testadas sobre as suas populações. Na maioria das amostras, a normalidade dos dados não se verificou. Na verdade, apenas para a comparação da operação “Montagem” entre os modelos 32 e 33, se verificou que as duas amostras recolhidas não rejeitavam a hipótese de pertencerem a uma população normal, i.e. não rejeitaram a H_0 do teste de Shapiro-Wilk.

Após o teste à normalidade, para comparar os tempos de processamento entre os modelos 7, 9 e 10 (tabela 5.5) aplicou-se o teste de Kruskal-Wallis. Em cinco dos oito processos em estudo, verificou-se que a duração da operação não diferiu significativamente com o modelo processado, podendo os seus dados serem agrupados. Nas Ligações BT e Ligações AT, foi rejeitada a hipótese nula do teste de Kruskal-Wallis, mas com a realização do teste de Mann-Whitney para cada par de amostras, verificou-se que duas das três populações em análise partilham a mesma distribuição e consequentemente os seus dados foram agrupados. Assim, e por exemplo nas Ligações BT, não foi rejeitada H_0 na comparação entre os tempos de processamento dos modelos 7 e 9, considerando-se que não existe evidência estatística que permita concluir que as amostras são provenientes de populações com distribuições diferentes, podendo os dados ser agrupados.

Tabela 5.5: Comparação entre os tempos de processamento: modelos 7, 9 e 10

	Montagem Enrolamento			Fecho Núcleo			Ligações BT			Ligações AT		
Teste Estatístico	7	9	10	7	9	10	7	9	10	7	10	9
Shapiro-Wilk	Rejeitar H ₀			Rejeitar H ₀			Rejeitar H ₀			Rejeitar H ₀		
Kruskal-Wallis	Rejeitar H ₀			Não Rejeitar H ₀			Rejeitar H ₀			Rejeitar H ₀		
Mann-Whitney	Rejeitar H ₀			NA			Não Rejeitar H ₀		-	Não Rejeitar H ₀		-
	Populações Diferentes			Agrupar Dados			Agrupar Dados		-	Agrupar Dados		-
	Reaperto			Preparação Tampa			Preparação Tinas			Ligações Exteriores		
Teste Estatístico	7	9	10	7	9	10	7	9	10	7	9	10
Shapiro-Wilk	Rejeitar H ₀			Rejeitar H ₀			Rejeitar H ₀			Rejeitar H ₀		
Kruskal-Wallis	Não Rejeitar H ₀			Não Rejeitar H ₀			Não Rejeitar H ₀			Não Rejeitar H ₀		
Mann-Whitney	NA			NA			NA			NA		
	Agrupar Dados			Agrupar Dados			Agrupar Dados			Agrupar Dados		

Por último, apenas na operação “Montagem Enrolamento” se verificou poderem existir diferenças significativas entre os três modelos em estudo, concluindo-se que os dados provêm de populações diferentes.

Para comparar as amostras referentes aos tempos dos modelos 32 e 33 (tabela 5.6), apenas o teste de Mann-Whitney é aplicado ($k < 2$), sendo que em duas operações, Bobinagem AT e Reaperto, não houve evidência estatística que permitisse rejeitar H_0 . Assim, nestas duas operações, os conjuntos de tempos de processamento dos dois modelos poderão ser agrupados.

Nas restantes duas operações foi rejeitada esta hipótese, tendo os tempos de processamento da operação “Montagem” a particularidade de pertencerem a uma população normal, o que implicou a realização do Teste F para comparar as variâncias das populações (e onde não foi rejeitada H_0) e do Teste T que permitiu afirmar, com 95% de confiança, que existem diferenças significativas entre a média dos dois conjuntos de tempos de processamento.

Tabela 5.6: Comparação entre os tempos de processamento: modelos 32 e 33

	Bobinagem Banda BT		Bobinagem AT		Montagem		Reaperto	
Teste Estatístico	33	32	32	33	32	33	32	33
Shapiro-Wilk	Rejeitar H_0		Rejeitar H_0		Não Rejeitar H_0		Rejeitar H_0	
Mann-Whitney	Rejeitar H_0		Não Rejeitar H_0		NA		Não Rejeitar H_0	
Teste F	NA		NA		Não Rejeitar H_0		NA	
Teste T	NA		NA		Rejeitar H_0		NA	
	Populações Diferentes		Agrupar Dados		Populações Diferentes		Agrupar Dados	

Após a estruturação dos dados já pode ser efetuado o ajustamento à distribuição estatística que melhor represente o comportamento de cada amostra (segundo objetivo da análise do *input*). Este processo, explicado no capítulo 4.4, consistiu em recorrer à ferramenta do *Arena*, *Input Analyzer*, para determinar qual a distribuição que melhor se ajusta a cada conjunto de dados, tendo em conta as quatro distribuições indicadas para estudar tempos de processamento: Gamma, Weibull, Lognormal e Erlang. A tabela 5.7 mostra os resultados para cada operação dos cinco modelos em estudo, tendo em conta o agrupamento de dados realizado no passo anterior.

Após a introdução de cada conjunto de dados no *Input Analyzer*, a função “*Fit All*”, indica qual a distribuição que melhor representa os dados introduzidos e os seus parâmetros. As distribuições são classificadas e ordenadas, da melhor para a pior, com base no critério do menor erro quadrático. A qualidade do ajustamento foi também aferida com a realização do teste de Kolmogorov-Smirnov (KS). O *p-value* calculado foi em todos os casos, superior a 0,05 (o nível de significância estipulado), indicando que não há evidência estatística para rejeitar o ajustamento à distribuição correspondente.

Tabela 5.7: Ajustamento dos dados a uma distribuição estatística

Operações	Modelo (s)	Distribuição de Probabilidade para o <i>Input</i> no Modelo	KS P-value
Bobinagem BT	7	7 + WEIB(39.6, 1.89)	> 0,15
Bobinagem AT	7	8 + WEIB(65.6, 1.23)	> 0,15
Aperto BT e AT	7	WEIB(26.2, 1.45)	> 0,15
Bobinagem V1	9, 10	17 + ERLA(15.7, 3)	> 0,15
Aperto V1	9, 10	2 + WEIB(8.26, 1.4)	> 0,15
Montagem Enrolamento	7	15 + ERLA(20.4, 2)	> 0,15
Montagem Enrolamento	9	8 + WEIB(34.3, 1.67)	> 0,15
Montagem Enrolamento	10	10 + WEIB(13.5, 1.52)	> 0,15
Fecho Núcleo	7,9,10	6 + WEIB(14.9, 1.7)	> 0,15
Ligações BT	7,9	2 + ERLA(8.13, 2)	> 0,15
Ligações BT	10	3 + LOGN(11.6, 22)	> 0,15
Ligações AT	7,10	10 + GAMM(11.2, 3.26)	> 0,15
Ligações AT	9	10 + WEIB(29.6, 2.22)	> 0,15
Reaperto	7,9,10	7 + GAMM(4.01, 3.3)	> 0,15
Preparação Tina	7,9,10	5 + WEIB(15.7, 1.74)	0,185
Preparação Tampa	7,9,10	0.999 + WEIB(11.9, 1.76)	0,133
Ligações Externas	7,9,10	ERLA(2.84, 4); 2 + WEIB(36.2, 2.03)	> 0,15
Banda BT	32	2 + LOGN(4.6, 3.58)	> 0,15
Banda BT	33	3 + ERLA(3.57, 2)	> 0,15
Bobinagem AT	32, 33	5 + WEIB(32.5, 1.74)	> 0,15
Montagem	32	35 + WEIB(79.7, 2.07)	> 0,15
Montagem	33	55 + ERLA(27.5, 3)	> 0,15
Reaperto	32, 33	5 + WEIB(12.8, 1.64)	0,126

De referir também que a bobinagem e o aperto V1 foram considerados idênticos para os modelos 9 e 10 devido a dados insuficientes para uma comparação. Por outro lado, a comparação efetuada entre os apertos BT e AT do modelo 7 permitiu verificar que não existem diferenças relevantes no seu tempo de processamento. Por último, as duas distribuições referentes às ligações externas representam a sua subdivisão como explicado anteriormente. A análise do *input* permitiu assim ajustar uma distribuição estatística a cada conjunto de dados, e introduzir no modelo de simulação a variabilidade presente no sistema real.

5.3. Desenvolvimento do Modelo de Simulação

A replicação do sistema real no modelo de simulação foi um processo iterativo, no qual se teve em conta a informação recolhida diretamente do sistema e sucessivas reuniões com os gestores do projeto em que foram definidos os pressupostos do modelo. Pretende-se simular no Arena, o mais realisticamente possível, o processo produtivo dos cinco modelos definidos no ponto 5.1.2.

Atualmente a FS opera em dois turnos de 8 horas, 5 dias por semana. Considerou-se que o número de recursos que operam nos dois turnos é semelhante, o que permitiu simular o funcionamento da fábrica com um único turno de 16 horas.

Na tabela 5.8 estão representados os recursos que operam na linha de produção por turno, e a capacidade dos autoclaves. Como referido, para realizar as operações de montagem, reaperto e preparação da tina e tampa, são necessários dois operadores que constituem uma equipa. Os 10 operadores referidos da tabela 5.8 constituem por isso um *set* de 5 equipas, que podem ser requisitados tanto para qualquer uma das operações de montagem como para fazer o reaperto.

Tabela 5.8: Recursos a operar em cada processo por turno

Operação/Processo	Operadores por Turno
Preparação Molde	1
Acabamento e Aperto	1 (V1 e V3) +1 (V2)
Montagem e Reaperto	10
Ligações Exteriores	2
Preparação Tina e Tampa	2
Autoclave	Capacidade
Vaporphase	3
Autoclave Bobines	9

Como ponto de partida para o modelo de simulação foram definidos vários blocos “*Create*” cujo papel é introduzir as peças (i.e. entidades) no sistema. Foram necessários 11 blocos deste tipo, três correspondentes ao modelo 7 e dois blocos para cada um dos restantes modelos, sendo a sua função introduzir no sistema os moldes de cada modelo e as tinas correspondentes. Assim, e como demonstra

a tabela 5.9, a cada ordem de produção corresponde a chegada ao sistema de três moldes e de uma tina, com exceção do modelo 7, que como necessita de dois tipos de molde (BT e AT), a cada ordem de produção chegam ao sistema seis moldes.

Tabela 5.9: Entidades criadas por Ordem de Produção

Modelo	Entidades por Ordem de Produção
Modelo 32	3x Molde32 & 1 Tina32
Modelo 33	3x Molde33 & 1 Tina33
Modelo 9	3x Molde9 & 1 Tina9
Modelo 10	3x Molde10 & 1 Tina10
Modelo 7	3x MoldeAT7 & 3x MoldeBT7 & 1 Tina7

Para cada conjunto de blocos “*Create*” relativos a um modelo, foi introduzido um bloco “*Assign*” que associa a cada entidade o tempo de chegada à linha (TNOW) e a duração das respetivas operações de bobinagem. Após este, as entidades encaminham-se para um bloco de decisão – “*Decide*” - que separa as tinas (que ficam a aguardar num bloco “*Hold*” – “Aguarda Encomenda Tina” - por um sinal que indique o início do seu processo) dos moldes, que são processados na operação “Preparação molde” e depois conduzidos para a Área de Bobinagem. De referir que esta operação é recente na FS e por isso não existem dados para o tratamento estatístico da sua duração, tendo sido definido um tempo fixo de 3 horas após observação do sistema real. Na figura A.I.0.1 do Anexo I é possível visualizar o conjunto dos blocos acima descritos. O tempo de transporte do molde para a Área de Bobinagem é de 30 minutos. Este movimento é definido no Arena através dos blocos “*Route*” e “*Station*”.

Quando as entidades chegam à Área de Bobinagem, o bloco “*Decide*”, denominado no modelo de simulação como “Tipo de Produto”, permite separar os moldes consoante o modelo e processo produtivo respetivo: os moldes 32 e 33 são encaminhados para a operação “Banda BT”, os moldes 9 e 10 para a “Bobinagem V1” e os moldes AT7 e BT7 para as respetivas “Bobinagem AT” e “Bobinagem BT”. Como referido anteriormente, é na fase de bobinagem que os modelos têm maiores divergências no seu fluxo produtivo, como é possível verificar na figura A.I.0.2 do Anexo I.

Cada operação de bobinagem é realizada por um recurso Homem-máquina. A linha de produção contém 11 máquinas de bobinagem, das quais 8 são idênticas. Das restantes, existe uma máquina que só pode fazer o enrolamento AT do modelo 7 (Máq. 1640) e outra que efetua apenas enrolamento AT dos modelos 32 e 33 (Máq. 1346). Por último, o enrolamento em banda é exclusivamente realizado na Máquina 1619. Foram assim criados três conjuntos de máquinas no Arena - *Set A*, *B* e *C* - e definidos os seus recursos como demonstra a tabela 5.10. Quando o molde chega a um processo de bobinagem, é escolhida a máquina do *set* há mais tempo disponível.

Tabela 5.10: Máquinas de bobinagem disponíveis na linha de produção

Operação	Máquinas do Set	Máquinas
Bobinagem V1	Set A (8 Máquinas)	1162; 1190; 1285; 768 e 1306; 1172; 1681; 1680;
Bobinagem V2 – Banda BT	1	1619;
Bobinagem V2 - AT	Set B (9 Máquinas)	1162; 1190; 1285; 768 e 1306; 1172; 1681; 1680; 1346;
Bobinagem V3 – BT	Set A (8 Máquinas)	1162; 1190; 1285; 768 e 1306; 1172; 1681; 1680
Bobinagem V3 – AT	Set C (9 Máquinas)	1162; 1190; 1285; 768 e 1306; 1172; 1681; 1680; 1640;

Os moldes dos modelos 32 e 33 iniciam a fase de bobinagem (Fig. A.I.0.2 e Fig. A.I.0.3) na operação “Banda BT”, na qual é bobinada a sua Baixa-Tensão. Os três moldes são depois temporariamente agrupados num bloco “*Batch*”, e são encaminhados para o autoclave de bobines onde é realizado o tratamento. O bloco “*Batch*” do Arena permite agrupar entidades segundo um atributo que tenham em comum, neste caso são agrupadas três entidades cujo atributo é o tempo de chegada à linha de produção, i.e. são agrupadas as entidades referentes à mesma ordem de produção. Após o tratamento, através do bloco “*Separate*”, o agrupamento anterior é desagregado para ser bobinada a AT de cada molde (“Bobinagem V2-AT”) na primeira máquina disponível do *set* B. De seguida, um bloco “*Decide*” divide os moldes do modelo 32 dos do modelo 33, e as entidades pertencentes à mesma ordem de produção são novamente agrupadas em dois blocos “*Batch*”, consoante o modelo. Este agrupamento dá por fim origem a uma nova entidade, denominada Enrolamentos 32 ou Enrolamentos 33, definida através dos blocos “*Assign*” – “Conj Bob M32” e “Conj Bob M33”. Nestes blocos também são imputadas às novas entidades os tempos de processamento das operações seguintes, analisados no capítulo anterior.

Por último, os Enrolamentos 32 e 33 seguem para a última operação da área de bobinagem: “Prensagem e Acabamentos V2”. De referir que, à falta de dados suficientes para analisar o seu tempo de processamento, juntamente com os responsáveis da fábrica se considerou que esta operação tem uma duração de 6 horas.

Por seu turno, os moldes 9 e 10 iniciam o seu processo na Área de Bobinagem (Fig. A.I.0.2) com a “Bobinagem V1”, onde é processado o enrolamento compacto de cada molde por uma máquina do *set* A. No seguimento, um bloco “*Decide*” (“Tipo de V1”) separa os moldes consoante o seu modelo, de modo a que as entidades já processadas aguardem num bloco “*Batch*” pela chegada da terceira entidade correspondente à sua ordem de produção. Quando o atributo tempo de chegada à linha é confirmado, os três moldes são agrupados numa nova entidade: Enrolamento 9 ou 10. Por último, dois blocos “*Assign*” associam às novas entidades os tempos de processamento das restantes operações da linha, tal como nos modelos 32 e 33.

Também nos moldes AT7 e BT7 é efetuada a respetiva bobinagem, “Bobinagem V3 AT” e “Bobinagem V3 BT”, antes de serem encaminhados para um bloco “*Batch*” que agrupa as três bobines AT ou BT de cada modelo. Na continuação, um bloco “*Assign*” associa a cada conjunto a informação relativa aos tempos de processamento no autoclave e no aperto. Nos modelos 7, 9 e 10, depois do agrupamento, as entidades são transferidas para o autoclave de bobines, onde é realizado o seu tratamento, sendo depois realizado o “Aperto e Acabamento de bobines” por um operador especializado nesta tarefa (Fig. A.I.0.3).

Após o aperto foi adicionado mais um bloco de decisão no Arena, de modo a dividir cada par de enrolamentos AT7 e BT7 (correspondentes a uma ordem de produção do modelo 7) dos restantes, para que estes sejam agrupados e deem origem a uma nova entidade, Enrolamentos 7. Relevante referir que com o intuito de analisar o tempo total de cada produto na fase de bobinagem foi introduzido um bloco “*Record*” que guarda a informação referente ao intervalo de tempo entre a chegada da entidade à linha e a saída da Área de Bobinagem.

Processados os enrolamentos dos diferentes modelos, através dos blocos “*Route*” e “*Station*” é modelado o seu transporte (60 minutos) para Área de Montagem, que contém atualmente 7 *box* (postos de trabalho) onde são realizadas as operações de montagem da parte ativa do transformador.

No entanto, previamente à linha de montagem propriamente dita, é importante analisar a questão das *box*. Quando um enrolamento chega à Área de Montagem e pelo menos uma das sete *box* está disponível, o enrolamento é imediatamente colocado numa das *box* e toma início a “Montagem de Enrolamentos”. Pelo contrário, quando as sete *box* estão ocupadas, o enrolamento tem de aguardar até um espaço ficar vago. Esta problemática foi introduzida no Arena recorrendo a um bloco “*Decide*” no qual a entidade só avança para uma *box* caso a expressão 5.1 seja verdadeira:

$$\begin{aligned} & \text{Montagem Enrolamentos.WIP} + \text{Fecho Nucleo.WIP} + \text{Ligações AT.WIP} + \\ & \text{Montagem V2.WIP} < 7 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Através da adição do WIP de cada operação da linha de montagem sabe-se quantas entidades estão na linha de montagem e consequentemente quantas *box* estão ocupadas. Quando o enrolamento chega ao bloco “Box Disponível?” e a expressão é falsa, a entidade tem que aguardar num bloco “*Hold*”, denominado “Espera de Box”, como está exposto na figura 5.5. Para libertar a entidade no momento certo foi introduzido um bloco “*Signal*” – “Liberta Box” - no final da linha de montagem (Fig. 5.6), cuja função é imitar um sinal, neste caso o sinal 1, que é rececionado pelo bloco “Espera de Box” e que, no seguimento dessa informação, liberta a entidade há mais tempo em espera.

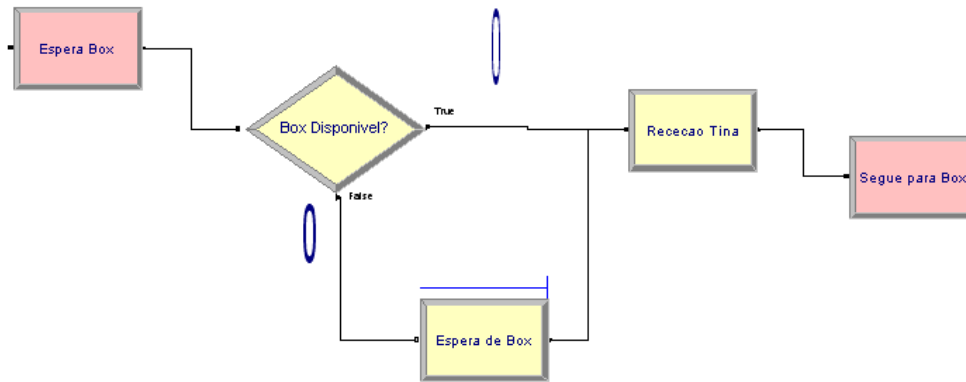


Figura 5.5: Modelação da entrada do enrolamento para a *Box*

Na FS as tinas chegam à linha de produção quando a parte ativa do transformador correspondente entra na linha de montagem. Para representar no modelo esta realidade, foi introduzido novo bloco “*Signal*” – “Receção Tina” - imediatamente antes de a entidade seguir para uma das *box* (Fig. 5.5). Consequentemente, antes de entrarem na linha, as entidades dão informação ao bloco “Aguarda Encomenda Tina” para libertar a tina correspondente a esse modelo, que é transferida para a Área de Preparação de Tinas. O sinal enviado é igual ao valor do tempo de chegada à linha, que será igual ao da respetiva tina.

Após a chegada do enrolamento à Área de Montagem, e como referido no capítulo 5.1.2, inicia-se a montagem da parte ativa do transformador que engloba quatro operações: “Montagem de Enrolamentos”, “Fecho do Núcleo”, “Ligações BT” e “Ligações AT”. Como as duas últimas podem ser realizadas simultaneamente, optou-se no Arena por colocar um bloco “*Separate*” após o “Fecho do Núcleo”, de modo a que, de uma forma fictícia, se divida o produto em duas partes, em que uma é encaminhada para as “Ligações BT” e outra para as “Ligações AT” (Fig. 5.6). Após a realização das duas atividades, as partes são novamente agregadas num bloco “*Batch*” – “Pativa Pronta”.

Por outro lado, e como a duração das quatro operações de montagem dos modelos 32 e 33 é inserida no sistema SAP numa só operação, foi necessário reproduzir no simulador um processo de montagem exclusiva para estes modelos, denominada “Montagem V2”.

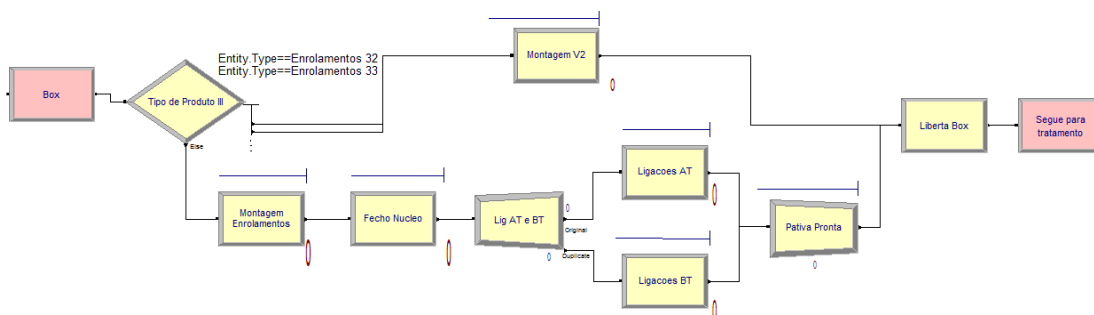


Figura 5.6: Modelação da linha de montagem

Finda a fase de montagem, a parte ativa do transformador é transportada (45 minutos) para a Área de Tratamento, junto ao *Vaporphase*. Este autoclave, com capacidade máxima para três unidades, e cujo processamento não pode ser interrompido, é apenas aberto imediatamente antes do “Reaperto” ter início. Por seu turno o “Reaperto” é realizado obrigatoriamente de manhã, permanecendo os produtos no *Vaporphase* para além do tempo de processamento necessário.

De modo a introduzir esta informação no Arena, foram criados dois blocos “Hold”, “Permanece Autoclave1” e “Permanece Autoclave2”, onde as entidades permanecem após o seu tratamento no *Vaporphase*, sendo apenas libertadas no início de cada dia, imediatamente antes do “Reaperto”. O sinal para a libertação das entidades foi introduzido através de um bloco “Create” que faz chegar uma entidade ao sistema de 16 em 16 horas (duração de um dia), e que por sua vez passa no bloco “Início Reaperto” que emite o sinal (sinal 3) para os dois blocos referidos anteriormente. Esta entidade, após fornecer a informação relativa à saída da parte ativa do *Vaporphase*, é eliminada num bloco “Dispose” denominado “Fim Entidade”. A figura 5.7 demonstra este processo.

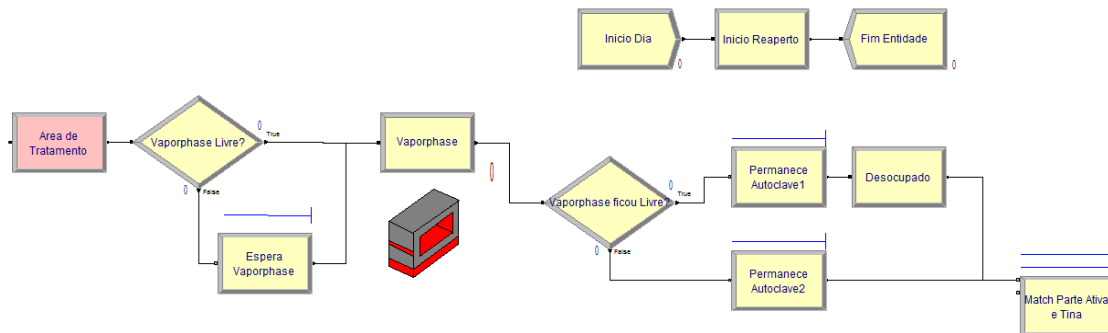


Figura 5.7: Modelação da área de tratamento

Previamente ao processo “*Vaporphase*” foi necessário modelar a entrada das partes ativas no autoclave, introduzindo um bloco “*Decide*” que contém a expressão 5.2:

$$(Vaporphase.WIP == 0) \ \&\& \ (NQ(Espera \ Vaporphase.Queue) == 0) \ \&\& \ (NQ(Permanece \ Autoclave1.Queue) == 0) \quad (5.2)$$

Caso a expressão seja verdadeira, a entidade avança para o autoclave, caso contrário, fica a aguardar no bloco “*Espera Vaporphase*”. A primeira ação só acontece quando o *Vaporphase* não estiver a processar nenhuma entidade ($Vaporphase.WIP == 0$) e se não existirem entidades na fila de espera para os blocos “*Espera Vaporphase*” e “*Permanece Autoclave1*” (reproduzindo na simulação a realidade em que as entidades, mesmo depois de processadas, aguardam no *Vaporphase* até ao início da manhã seguinte).

No seguimento, quando a entidade sai do *Vaporphase*, passa por um novo bloco “*Decide*” em que é avaliada a expressão: “ $Vaporphase.WIP == 0$ ”. Em caso afirmativo a entidade encaminha-se para o bloco “*Permanece Autoclave1*”, caso a resposta seja negativa, encaminha-se para o bloco “*Permanece*

Autoclave2”. Este procedimento permite que, no caso de várias partes ativas estarem simultaneamente em tratamento, estas são encaminhadas para o segundo bloco até que a última entidade deixe o autoclave livre, e siga para bloco “Permaneça Autoclave1”. As entidades aguardam então nos dois blocos pelo sinal 3 referido anteriormente. Após a sua emissão, as entidades que estão no bloco “Permaneça Autoclave2” são libertadas e seguem o seu processamento, ao passo que a entidade que está no primeiro bloco é libertada mas passa no bloco “Desocupado” antes de seguir para o “Reaperto”. A passagem da entidade neste bloco “*Signal*” indica que o *Vaporphase* está livre e permite que três novas entidades, em espera no bloco “Espera *Vaporphase*”, entrem para o autoclave.

Enquanto se efetua a montagem da parte ativa e o seu tratamento, numa área distinta - Área Preparação Tinas - é preparada a tina e a tampa de cada transformador, que devem estar concluídas antes da parte ativa correspondente sair do *Vaporphase*. Esta área contempla três operações que são executadas por uma equipa de dois operadores (Equipa Tinas): “Preparação Tampa”, “Preparação Tina” e “Montar Caixa”. A terceira operação é recentemente realizada nesta área e consequentemente, não foi possível coletar dados para o seu tempo de processamento, tendo sido pré-definido uma duração de 4 horas. Por último, como é visível na figura 5.8, é efetuada por um eletricista 75% de uma quarta operação, as “Ligações Exteriores”. A restante duração desta operação só pode ser realizada após o reaperto e encubagem.

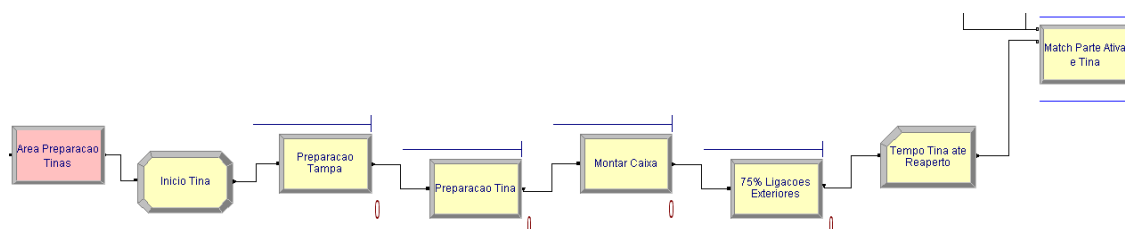


Figura 5.8: Modelação da área preparação tinas

Como a figura 5.8 demonstra, também foi introduzido nesta área o bloco “Início Tina” que regista o início do processamento das tinas através do atributo TNOW, e um bloco “*Record*”, que grava o tempo que tina e tampa permanecem nesta área.

Completados os 75% das “Ligações Exteriores”, a entidade (tina) segue para o bloco “*Match Parte Ativa e Tina*” enquanto aguarda que a entidade referente à parte ativa do mesmo transformador acabe o seu tratamento no *Vaporphase*. O bloco “*Match*” sincroniza as entidades fazendo-as esperar umas pelas outras, em diferentes filas de espera. Quando duas das entidades têm o mesmo valor para o atributo especificado, neste caso, o tempo de chegada à FS - “*Tchegada*” - ocorre a sincronização e as entidades saem juntas para o processo seguinte, um bloco “*Batch*” que agrupa a tina e a parte ativa de cada transformador e forma uma nova entidade que é transportada para a Área do Reaperto.

A penúltima operação da linha de produção consiste no reaperto da parte ativa do transformador e na encubagem, processo que é realizado por duas equipas (4 operadores) do *set* de montagem e é geralmente denominado apenas por “Reaperto”. Devido a limitações de espaço e como necessita de vários operadores do mesmo *set*, só são realizados dois reapertos em simultâneo na FS. Para modelar estas características iniciou-se o processo com um bloco “*Hold*” – “Espera Área Reaperto” – de modo a que a entidade ao chegar a esta área, fique em fila de espera sempre que a expressão 5.3 não se verificar. Assim, a entidade avança unicamente quando no máximo um reaperto está a ser executado.

$$Reaperto1.WIP + Reaperto2.WIP \leq 1 \quad (5.3)$$

O facto de o “Reaperto” ser, sempre que possível, processado imediatamente depois de a parte ativa sair do *Vaporphase* implica que os seus executantes, operadores do *set* de montagem, parem o que estão a fazer na linha de montagem para se dedicarem a esta operação. Esta característica do processo conduziu à utilização no Arena do bloco “*Preempt*” que permite às entidades apropriarem-se de recursos específicos. Neste caso, cada entidade passa em dois blocos “*Preempt*” (Fig. 5.9), apropriando-se da Equipa 1 e 2, ou da Equipa 3 e 4 do *set* de montagem. Estas equipas param imediatamente o que estão a fazer (qualquer outra operação de montagem) e executam o “Reaperto”. Só após o seu término os recursos voltam ao processo em que estavam a trabalhar.

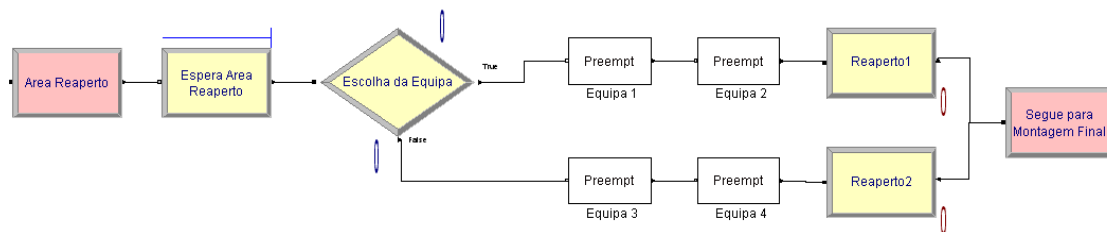


Figura 5.9: Modelação da área do reaperto

Como se verifica na figura 5.9, também foi introduzido um bloco de decisão “Escolha da Equipa”, com a expressão “ $Reaperto1.WIP == 0$ ” de modo a permitir que, quando não estiver a ocorrer nenhum “Reaperto”, a entidade se dirija sempre ao bloco “Reaperto1”, escolhendo a Equipa 1 e Equipa 2 para o seu processamento.

Por fim, o transformador é transportado (30 minutos) para a Área de Montagem Final (Fig. 5.10), onde são processados os 25% restantes da operação “Ligações Exteriores”. Esta operação é realizada por um electricista por transformador. Simultaneamente é efetuado o vácuo e enchimento do transformador processos que, como referido anteriormente, não necessitam de operadores. O bloco “*Record*” no final da linha recolhe a informação relativamente ao *lead time* de todas as entidades, uma das estatísticas que se pretende avaliar.

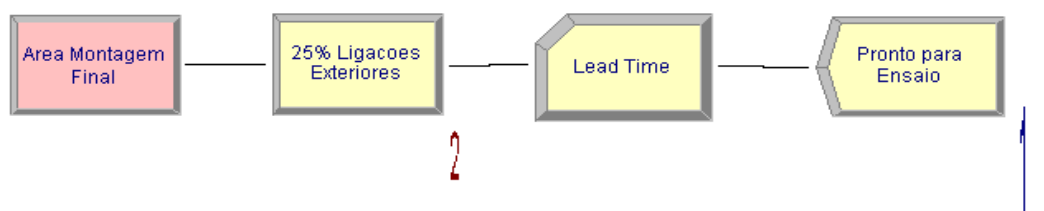


Figura 5.10: Modelação da área montagem final

A saída das entidades da linha é processada por um bloco “*Dispose*” que também recolhe todas as estatísticas das entidades envolvidas.

5.3.1. Validação do Modelo

Modelada a linha de produção da FS no *software* Arena, e após a realização no Capítulo 5.2 das diferentes atividades relacionadas com o *input* dos dados no modelo, torna-se essencial passar à etapa seguinte, a verificação e validação do modelo tal como exposto no Capítulo 3.5. Esta etapa é conjugada com a análise do *output* e é essencial para determinar se o modelo é uma representação fiel da realidade.

A verificação foi efetuada através de um longo processo experimental de tentativa-erro, ajudada pelas sucessivas reuniões com os representantes do projeto em que foram acertados pormenores e eliminados erros à medida que o modelo foi desenvolvido. Como neste caso de estudo é possível recolher dados do sistema real, para validar o modelo o objetivo é comparar o *output* do modelo com o *output* do sistema. Se os dois conjuntos de dados forem semelhantes o modelo é considerado válido, o que permite ao gestor tomar decisões baseado nos resultados do modelo, como se fosse viável realizar as experiências no próprio sistema.

Para comparar os *outputs*, introduziu-se no modelo de simulação uma procura que refletisse a produção atingida na FS no ano de 2012, para cada um dos produtos que estão no âmbito desta dissertação, como está exposto na tabela 5.11.

Tabela 5.11: Produção atingida pela FS: 2012

Produtos	Produção Anual	Tempo entre Chegadas
Modelo 7	28	9,1
Modelo 9	21	12,1
Modelo 10	21	12,1
Modelo 32	18	14,1
Modelo 33	19	13,4
TOTAL	107	

Pretende-se assim replicar o funcionamento da linha de produção da FS no ano de 2012. O tempo entre chegadas de cada modelo é obtido após a divisão do número de dias úteis de 2012 (254 dias) pelo número de modelos a produzir. O valor do tempo entre chegadas é de seguida introduzido no bloco “*Create*” correspondente a cada modelo. Na simulação foram utilizados os recursos presentes na FS, definidos na tabela 5.8.

Com a utilização no modelo de diversas distribuições de probabilidade, as estimativas derivadas da simulação são realizações particulares de variáveis aleatórias que contêm elevada variância. Consequentemente, os resultados de uma corrida podem diferir significativamente das verdadeiras características do modelo o que pode levar a retirar conclusões erradas sobre o sistema em estudo. A validação do modelo deve assim ser confrontada com uma análise do *output* recorrendo a métodos estatísticos para estimar as verdadeiras medidas de desempenho do modelo e minimizar o erro associado. Por outro lado, as medidas de desempenho utilizadas para validar o modelo devem incluir aquelas que o gestor do projeto utiliza para avaliar o desempenho do sistema, neste caso o *lead time* da produção e o número de transformadores produzidos por ano.

A análise do *output* consistiu em determinar o período de “aquecimento” – *warm-up* – e o número de replicações. A linha de produção da FS é um sistema não-terminal (*steady-state*), pois não apresenta condições iniciais fixas nem existe nenhum evento natural que especifique a duração da corrida de simulação. Contrariamente aos sistemas terminais, que na sua condução inicial apresentam um sistema vazio e os recursos desocupados (sem filas de espera), num ambiente fabril estas condições não se verificam. Assim, nos sistemas *steady-state*, é determinante definir um período de *warm-up* durante o qual não são recolhidas estatísticas, o que permite reduzir o impacto que as condições iniciais têm nos resultados. Ao impedir a recolha de estatísticas quando os recursos estão todos livres age-se de modo a que estas não adulterem o *output* gerado.

Para definir o período de *warm-up* realizou-se uma primeira simulação com 10 replicações. Através do módulo *Statistic* do Arena obtiveram-se as estatísticas referentes à média do *lead time* de cada um dos modelos da FS e, com a ajuda do *Output Analyzer* (ferramenta do Arena), construíram-se vários gráficos (Fig. 5.11) nos quais se verifica o comportamento da variável de resposta ao longo da simulação de 254 Dias (4064 horas).

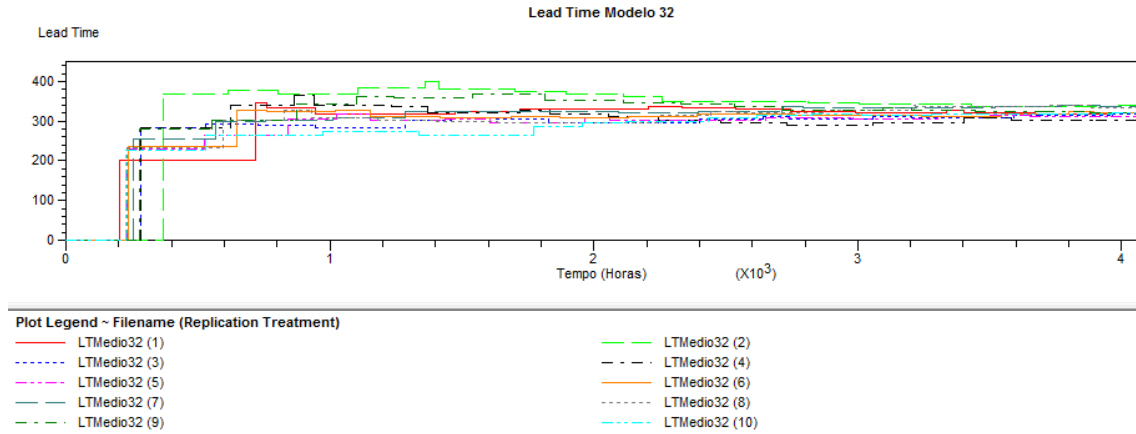


Figura 5.11: Lead Time médio do modelo 32

A duração do *warm-up* é determinada através de uma observação visual dos vários gráficos resultantes do *Output Analyzer*. Pretende-se identificar a partir de que período a variável estabiliza o seu valor. Como se verifica na figura 5.11, inicialmente não são registados quaisquer valores pois a linha de produção no início de cada corrida encontra-se vazia. Após 200 horas são registados os primeiros *lead time*, cujos valores são significativamente inferiores em relação à média da variável após as 10 replicações: 322,87 horas. Com o período de *warm-up* pretende-se eliminar este espaço temporal.

Como para diferentes dados de *output* resultam diferentes períodos de *warm-up*, é prática comum considerar-se um valor conservador. Assim, com base na análise dos gráficos, determinou-se um período de *warm-up* de 800 horas o que equivale a 50 dias. Com o período de “aquecimento” estabelecido, a duração da simulação passa de 254 dias para 304 dias de modo a obter igualmente os resultados de um ano de funcionamento da linha de produção.

A análise do *output* implica também a determinação do número de replicações adequado para a obtenção de medidas de desempenho com reduzido erro (elevada precisão). Este cálculo resulta da utilização de dados estocásticos na simulação, que fazem divergir o *output* de cada replicação.

O objetivo é calcular o número de replicações necessárias para que, em 95% dos casos, se obtenha uma estimativa da medida de desempenho pretendida que pertença a um intervalo de confiança cujos limites não sejam superiores a 5% (% erro) da média obtida para a variável.

Este cálculo é efetuado através das fórmulas 5.4 e 5.5, em que n é o número de replicações a calcular, n_0 o número de replicações iniciais, h_0 o valor obtido do *half-width* (valor de metade do intervalo de confiança) e h o *half-width* desejado.

$$n = n_0 \times \frac{h_0^2}{h^2} \quad (5.4)$$

$$Erro (\%) = \frac{h}{\bar{x}} \quad (5.5)$$

O intervalo de confiança para a variável em estudo, o valor médio do *lead lime* para cada modelo de produção, é gerado através do *Output Analyzer*, recorrendo aos dados retirados da simulação anterior

(com 10 replicações e com o *warm-up* calculado) e armazenados através do módulo *Statistic*. Na tabela 5.12 estão expostos os valores calculados para as principais medidas de desempenho a comparar com o *output* da FS.

Tabela 5.12: Cálculo do número de replicações para a medida de desempenho *lead time*

Medida Desempenho	\bar{X} (dias)	h_0	h	n
Lead Time Modelo 7	477	10,08	23,85	2
Lead Time Modelo 9	402	8,84	20,10	2
Lead Time Modelo 10	385	14,61	19,25	6
Lead Time Modelo 32	327	7,44	16,35	2
Lead Time Modelo 33	378	10,85	18,90	3

A análise do *output* permite verificar que as 10 replicações são suficientes, pois o *half-width* desejado em nenhum dos casos é superior ao *half-width* calculado. É possível assim concluir a etapa da validação do modelo, comparando os resultados da simulação com os dados do sistema real.

A figura 5.12 contém um resumo dos resultados da simulação. Como era desejado cumpriu-se a procura introduzida e no final dos 304 dias o modelo da linha de produção produziu 107 transformadores. Também a média do *lead time* de cada transformador foi considerado semelhante à realidade da FS. Após uma reunião com os responsáveis do projeto o modelo foi considerado válido e consequentemente avançou-se para a etapa seguinte, com a construção de cenários para uma elevada procura na FS, aplicando a Teoria das Restrições.

Scenario Properties			Responses				
S	Name	Reps	System.NumberOut	LeadTimeMedio	Enrolamentos 7.TotalTime	Enrolamentos 32.TotalTime	Enrolamentos 33.TotalTime
4	Modelo Inicial	10	106.500	401.098	476.531	327.495	377.884

Figura 5.12: Resultados de 10 replicações

5.4. Aplicação da TOC ao Caso em Estudo

O objetivo deste caso de estudo, do ponto de vista da FS, é prever o funcionamento da sua linha de produção para uma procura que se prevê nos próximos anos ser muito superior à atual. Será assim imprescindível redimensionar os recursos, através da simulação, de modo a conseguir responder à procura registada na tabela 5.13. Pretende-se passar dos 107 transformadores produzidos em 2012 para uma produção de aproximadamente 230 transformadores.

Tabela 5.13: Procura anual planeada para a FS

Modelo FS	Procura Anual Planeada
7	50
9	30
10	32
32	60
33	60
Total	232

Juntamente com a definição da procura, foi elaborado o planeamento mensal das entregas das ordens de produção aos clientes, ilustrado na tabela 5.14. Esta previsão teve em conta o padrão de entregas dos últimos 5 anos. Uma nota para o facto de não serem passíveis de aplicar técnicas de previsão devido à escassez de dados.

Tabela 5.14: Plano anual de entregas ao cliente

Modelo FS	7	9	10	32	33
Janeiro	4	3	1	4	2
Fevereiro	4	2	5	3	7
Março	2	4	5	1	0
Abril	3	1	3	6	9
Maió	0	2	0	5	15
Junho	1	3	5	9	5
Julho	3	3	1	4	2
Agosto	8	3	3	8	7
Setembro	10	5	2	2	2
Outubro	3	2	3	3	2
Novembro	3	0	1	8	5
Dezembro	9	2	3	7	4
Total	50	30	32	60	60

Para introduzir no modelo de simulação a informação relativa ao planeamento mensal, foi necessário construir um complexo sistema no Arena, o qual permite definir as unidades a introduzir na linha de produção no início de cada mês da simulação. A figura A.I.0.4 do Anexo I ilustra a modelação arquitetada para atribuir o modelo da FS a cada entidade que entra na linha, e na figura A.I.0.5 são representados os blocos relativos a cada mês, que contêm a informação do planeamento definido.

De modo a cumprir o planeamento pretende-se aplicar no modelo de simulação validado, os conceitos intrínsecos à TOC e ao processo de melhoria contínua numa primeira fase, e o seu mecanismo de gestão das operações, o DBR, numa segunda fase.

A primeira fase consistiu na realização de um processo iterativo, com base nos cinco passos da TOC, procurando quebrar as sucessivas restrições presentes no modelo da FS, até o *output* do modelo (capacidade do sistema) se aproximar ou igualar a procura prevista.

A organização em questão já aplica métodos Lean e 6S na linha de produção, no entanto, não foca as suas ações na restrição do sistema, nem faz uso do método Kanban. O processo de melhoria contínua da TOC, e da sua integração TLS, inicia-se com a identificação do recurso limitante do sistema sendo nessa área que devem incidir as técnicas do Lean e 6S.

No presente caso de estudo, a restrição do sistema é identificada através da realização de múltiplas corridas do modelo de simulação, onde são identificados os processos com maiores filas de espera ou com maiores taxas de utilização dos recursos.

De seguida, e em concordância com o segundo passo da TOC, o recurso limitante é ultrapassado, melhorando-se o seu desempenho e aumentando a capacidade do sistema. Explorada a restrição, o modelo é de novo corrido (subordinar o sistema à restrição) e uma nova restrição aparece, dando início a um novo ciclo. A simulação permite realizar este processo rapidamente e sem afetar o funcionamento da linha de produção, sendo esta uma das suas maiores vantagens. Os referidos passos são executados neste projeto recorrendo ao *Process Analyzer*, ferramenta que é parte integrante do Arena e que permite, através da variação dos controlos do sistema, verificar os resultados de cenários alternativos.

Atualmente na FS, os produtos são introduzidos na linha conforme a disponibilidade dos recursos e de modo a entregar a encomenda ao cliente no prazo acordado. O facto de não terem em conta a capacidade limitada dos seus recursos, conduz a que grandes quantidades de WIP se encontrem na linha de produção. Para reproduzir esta realidade no modelo, considerou-se numa primeira fase que até emitirem todas as ordens de produção para o mês seguinte, de 9 em 9 horas chega um produto à linha de produção, pois é esse o tempo que o primeiro recurso demora a processar uma ordem de produção.

A tabela 5.15 contém um resumo das iterações realizadas e resultados das simulações produzidas. No cenário inicial verificou-se que o *output* médio do sistema era de apenas 120 produtos. Também se constatou a existência de dois processos com elevadíssimas filas de espera, a “Preparação Tampa” (em média 382 horas de espera) e a “Espera de Box” (em média 916 horas). Por outro lado, a taxa de utilização dos recursos nestes processos é igual a 1, como ilustra a primeira linha da figura 5.13. Através do *Process Analyzer* aumentou-se em uma unidade os recursos “Equipa Montagem” num primeiro cenário, e a “Equipa Tinas” num segundo cenário. Os resultados apresentados nas primeiras linhas da figura 5.13 evidenciam que a “Equipa Tinas” é o recurso limitante do sistema atual.

	Scenario Properties		Responses								
	Name	Reps	Lead Time	System.Number Out	Preparacao Tampa.Queue. WaitingTime	Espera de Box.Queue. WaitingTime	75% Ligacoes Exteriores.Queue. WaitingTime	Equipa 1.Utilization	Equipa Tinas 1.Utilization	Eletricista 1.Utilization	Bobinagem V1.Queue. WaitingTime
1	Cenário Inicial	10	1506.144	119.700	382.380	916.509	2.415	1.000	1.000	0.649	179.509
2	6 Eq Montagem	10	1493.740	118.100	800.904	531.149	1.801	1.000	1.000	0.654	189.874
3	1ª RESTRIÇÃO: 2 Eq Tinas	10	1422.397	129.400	2.918	901.743	10.682	1.000	0.558	0.718	197.291
4	2ª RESTRIÇÃO: 6 Eq Montagem	10	1188.690	155.700	5.452	645.888	29.043	1.000	0.670	0.865	188.453
5	3ª RESTRIÇÃO: 7 Eq Montagem	10	978.369	177.300	8.335	362.535	162.747	1.000	0.783	0.995	195.288
6	2 Tinas + 7 Eq Montagem + Elect	10	953.493	181.500	7.727	375.015	3.667	1.000	0.766	0.743	187.375
7	2 Eq Tinas + 8 Eq Montagem	10	924.672	181.400	20.387	139.255	314.493	0.992	0.889	0.997	191.873
8	4ª RESTRIÇÃO: 8 Eq Montagem + Elect	10	789.807	200.300	13.353	176.446	5.638	0.991	0.857	0.797	186.532

Figura 5.13: Construção de cenários através do *Process Analyzer*

Logicamente, após ser quebrada esta restrição é inevitável ultrapassar a limitação das equipas de montagem, introduzindo a sexta “Equipa Montagem” no modelo. Recorde-se que inicialmente foram definidos 10 operadores (5 equipas) para o *set* de montagem e 2 operadores (1 equipa) para as operações relacionadas com a tina e tampa do transformador (tabela 5.8). Com a adição de uma equipa de montagem e outra de tinas, o *output* médio do modelo aumenta para 156 transformadores, valor ainda longe do pretendido. O processo iterativo prosseguiu com a introdução de mais duas equipas de montagem e de um terceiro eletricista (4ª iteração), com o objetivo de aumentar a produção anual e reduzir o *lead time*.

Tabela 5.15: Quadro resumo das iterações realizadas

Modelo FS	Output Médio do Modelo	Recurso Limitante	Explorar a Restrição
Cenário Inicial	119,7	Equipa Tinas	2 Equipas Tinas
1ª Iteração	129,4	Equipa Montagem	6 Equipas Montagem
2ª Iteração	155,7	Equipa de Montagem	7 Equipas Montagem
3ª Iteração	177,3	Equipa de Montagem e Eletricista	8 Equipas Montagem + 3 Eletricistas
4ª Iteração	200,3	Espaço Físico - Box	Aumento para 8 box + 9ª Equipa Montagem
5ª Iteração	210,3	Máquina Bobinagem	Nova Máquina Bobinagem
6ª Iteração	215,5	-	-

Ultrapassada a quarta restrição, a adição de recursos deixa de produzir resultados satisfatórios, verificando-se um elevado tempo de espera na fila “Espera de Box”. Este tempo é determinado pelo resultado da equação 5.1, onde é limitado o número de *box* existentes. O aumento do número de equipas de montagem, não faz sentido sem criar primeiramente um novo espaço para a montagem da parte ativa, uma nova *box*, pois todas as operações, excetuando o “Reaperto”, são efetuadas por uma equipa por *box*.

Como a FS tem espaço disponível na sua linha de produção, é necessário assim aumentar para 8 as *box* existentes na linha, de forma a quebrar mais uma restrição. Com a adição de uma *box* este estudo

também sugere a contratação da 9ª “Equipa de Montagem”, o que permite elevar para 210 o número médio de transformadores produzidos durante um ano.

Também é de salientar que por indicação da fábrica, os recursos afetos à bobinagem (*set* de máquinas) só serão modificados em último caso, pois tais alterações implicam elevados custos para a organização. Consequentemente, e apesar de neste momento esse ser o seu recurso limitante (com base no tempo de espera e taxa de utilização das máquinas de bobinagem), é analisada outra forma de elevar o sistema.

Apesar de vários cenários examinados, como se ilustra na figura 5.14, foi impossível aumentar substancialmente o *output* do sistema sem aumentar a atual restrição do sistema. As filas de espera pertencentes a estes processos situam-se entre as 180 horas e as 220 horas o que torna inevitável a aquisição por parte da FS de mais uma máquina de bobinagem.

Contudo, verifica-se que mesmo com a introdução de uma nova máquina de bobinagem e com 11 “Equipas de Montagem” o *output* médio do sistema situa-se nos 216,4 produtos. Salienta-se ainda a redução substancial do valor médio do *lead time* após a superação de cada restrição do sistema.

Scenario Properties		Responses											
	Name	Lead Time	System Number Out	Bobinagem V1 Queue Waiting Time	Preparacao Tampa Queue Waiting Time	Espera de Box Queue Waiting Time	75% Ligacoes Exteriores Queue Waiting Time	Espera Vaporphase Queue Waiting Time	Maq 1190 Utilization	Equipa 1 Utilization	Equipa 5 Utilization	Equipa Tinas 1 Utilization	Eletricista 1 Utilization
13	Cenário 8 Box 9 Eq	700.321	210.300	194.485	25.885	62.833	6.679	33.599	0.961	0.955	0.883	0.902	0.790
15	Cenário 9 Box 10 Eq	658.437	212.100	182.417	31.525	38.196	7.314	38.556	0.959	0.913	0.826	0.912	0.792
16	Cenário 9 Box 11 Eq	664.286	212.400	193.276	34.880	31.602	6.827	40.320	0.962	0.893	0.674	0.913	0.797
17	Cenário 9 Box 11 Eq + Equipa Tinas	658.931	212.200	188.136	2.328	32.862	11.906	39.084	0.963	0.881	0.671	0.581	0.808
18	Cenário Maq Extra	621.886	215.500	122.451	34.244	40.979	7.677	39.730	0.921	0.927	0.830	0.934	0.808
19	Cenário Maq Extra + 11 Eq	612.934	216.400	123.240	34.473	37.432	6.886	38.090	0.917	0.880	0.691	0.928	0.809

Figura 5.14: Resultados da análise de cenários

Para validar os resultados do simulador, e confirmar que a atual restrição do sistema é o conjunto de máquinas de bobinagem, foi realizado o cálculo da carga sobre cada recurso através da fórmula 5.6.

$$Carga\ sobre\ o\ Recurso\ (\%) = \frac{Capacidade\ Necessária\ por\ Ano}{Capacidade\ Disponível\ por\ Ano} \times 100 \quad (5.6)$$

Comparando o tempo requerido para o recurso processar a produção anual (capacidade necessária) com o tempo disponível por ano do mesmo recurso (capacidade disponível) obtém-se a carga sobre o recurso. A capacidade disponível tem em conta os 254 dias úteis do ano e as 16 horas diárias de trabalho.

A tabela 5.16 apresenta os resultados dos cálculos realizados para cada recurso. Da sua análise pode-se concluir que o recurso com maior carga será a restrição do sistema. Por outro lado, se resultarem valores acima de 100% não será possível realizar o planeamento.

Tabela 5.16: Carga sobre os recursos da linha de produção FS

Recurso	Número de Recursos	Capacidade Disponível (h)	Carga (%)
Preparador Molde	1	4064	62,45
Bobinagem V2 BT	1	4064	74,25
Set Maquinas Bobinagem	10	40640	100,77
Set Maquinas Bobinagem	11	44704	91,61
Set Equipa de Montagem	9	36576	100,44
Set Equipa de Montagem	10	40640	90,40
Preparador Acabamentos	1	4064	43,72
Preparador Acabamentos V2	1	4064	17,72
Set Equipa Tinas	2	8128	87,46
Eletricistas	3	12192	86,52
Vaporphase	3 (Capacidade)	12192	77,02
Autoclave Bobinagem	3 (Capacidade)	12192	67,45

Analisando a tabela 5.16 conclui-se que os recursos com maior carga, e tal como se verificou através do *Process Analyzer*, são o conjunto de “Equipas Montagem” e o de “Máquinas Bobinagem”. Confirmou-se também que o número de máquinas de bobinagem que a FS contém atualmente é insuficiente para produzir a procura prevista. Por outro lado, a fábrica terá de contratar 10 equipas de montagem para cumprir o plano.

Com os resultados produzidos neste capítulo dimensionou-se a linha de produção para a procura prevista. Contudo, apesar não existir nenhum recurso com carga superior a 100%, os resultados da simulação não obtêm o *output* pretendido. Este resultado prende-se provavelmente com o planeamento da linha de produção e a elevada variabilidade presente no sistema, como se analisará no capítulo seguinte.

5.4.1. Aplicação no Modelo do *Drum-Buffer-Rope* (DBR)

O DBR é um mecanismo que tem como objetivo potenciar o *T* do sistema através da proteção do seu elo mais fraco contra a dependência e variabilidade dos processos. No capítulo anterior foi realizado o primeiro passo do DBR: a identificação do “tambor”. Este mecanismo só é aplicado depois de determinada a restrição porque necessita de ser reconfigurado cada vez que a mesma é superada.

Segundo a TOC e a sua aplicação à produção (DBR), quem define o ritmo do sistema é o seu recurso limitante. Pretende-se que o fluxo sobre o *set* de máquinas de bobinagem (a restrição da linha) seja igual à procura do mercado. Para tal, é imprescindível criar um plano detalhado para o conjunto de máquinas e seguir esse planeamento – segundo passo do DBR.

Na presente dissertação, o planejamento da restrição foi construído através de um algoritmo calculado no *Solver* do *Microsoft Excel*. Partindo do plano anual de entregas ao cliente (tabela 5.14), o objetivo é determinar um plano que tenha em conta a capacidade da restrição e a maximização do lucro. Sabendo que o *set* de máquinas de bobinagem tem uma capacidade mensal de 3725,3 horas (44704 horas a dividir por 12 meses), e a margem de contribuição para o lucro estimada para este estudo (tabela 5.17), foi determinada a solução demonstrada na figura 5.15.

Tabela 5.17: Dados de entrada no *Solver*

Modelo FS				
7	9	10	32	33
Margem de Contribuição para o Lucro (UM)				
225	150	250	300	200
Tempo Processamento Médio Bobinagem (h)				
335,68	192,41	192,41	102	102

	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	Variável Decisão							
2	Mês	Modelo 7	Modelo 9	Modelo 10	Modelo 32	Modelo 33	Total do recurso (h)	Lucro
3	1	4	3	1	7	9	3725,33	5462,78
4	2	4	2	10	1	0	3725,33	3935,95
5	3	2	5	3	6	9	3725,33	5451,44
6	4	3	2	0	5	15	3494,42	5358,11
7	5	1	3	5	9	5	3302,94	5400,00
8	6	3	3	1	4	2	2388,68	2826,25
9	7	3	3	3	8	7	3725,33	5355,84
10	8	6	5	2	2	2	3725,33	3320,80
11	9	9	0	1	3	2	3725,33	3285,51
12	10	4	2	3	8	5	3725,33	4930,75
13	11	5	2	3	7	4	3725,33	4545,12
14	12	6	0	0	0	0	1964,55	1171,95
15								
16							TOTAL OTIMO	51044,50
17	Total do recurso (h)/Un	335,68	192,41	192,41	102,00	102,00		
18								
19	Capacidade Mensal 11 Maq							
20	3725,3							
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								

Célula de destino:	\$V\$16	Solucionar
Igual a:	<input checked="" type="radio"/> Máximo <input type="radio"/> Mínimo <input type="radio"/> Valor de 0	Fechar
Por alteração das células:	\$P\$3:\$T\$14	Estimar
Sujeito às restrições:	\$U\$3:\$U\$14 <= \$O\$20 \$Y\$3:\$AC\$14 <= \$I\$3:\$M\$14 \$Y\$3:\$AC\$14 >= \$I\$18:\$M\$29	Adicionar Alterar Eliminar Opções Repor tudo Ajuda

Figura 5.15: Solução proposta para o plano detalhado da restrição

A solução resultante do *Solver* pretende maximizar o lucro e está sujeita a três restrições ilustradas na figura 5.15:

- 1) As horas gastas pelo recurso restritivo não podem superar a sua capacidade disponível;

2) A variável de decisão (plano mensal da restrição) tem que pelo menos igualar o plano da tabela 5.14, ou seja, os prazos entregas de cada mês têm de ser cumpridos;

3) O plano de um mês pode incluir ordens de produção para o mês seguinte. Isto significa que caso a restrição tenha capacidade, pode processar em Janeiro encomendas com prazo de entrega apenas em Fevereiro.

A matriz resultante do algoritmo (marcada a verde na Fig. 5.15) permitiu elaborar o plano de produção do *set* de máquinas de bobinagem para o período de tempo definido, um ano. Pretende-se que mensalmente, a restrição processe em primeiro lugar a quantidade calculada do modelo 32, de seguida do modelo 10, 7, 33 e por último o modelo 9 conforme a contribuição para o lucro pré-definida. Verifica-se que somente nos meses de Abril, Maio, Junho e Dezembro não é utilizada a totalidade da capacidade da restrição, o que está em linha com carga determinada para o conjunto de 11 máquinas: 90,40%. Uma nota especial para o mês de Dezembro no qual, devido ao algoritmo não contabilizar a procura de Janeiro do ano seguinte, só se preveem entregar seis produtos.

O planeamento da restrição foi assim introduzido no simulador, ultrapassando-se o segundo passo do DBR. Terminada esta fase, é possível progredir para a determinação do *buffer* da restrição e a introdução da corda (último elemento do DBR) no modelo. Para o cálculo do tamanho inicial do *buffer* aplicou-se a regra referenciada no Cap. 2.1.4, que consiste em reduzir para metade (50%) o *lead time* atual da organização na parte do sistema que se pretende proteger (tabela 5.18).

Relativamente à introdução da corda, e devido ao facto de não existirem datas concretas para a entrega das ordens de produção (só se sabe o objetivo no final do mês), não é possível definir a calendarização exata das entradas dos produtos no sistema. Contudo, tendo em conta o objetivo de produção mensal (resultante do planeamento do *Solver*), e o tamanho do *buffer* da restrição de cada um dos modelos da FS, é possível calcular o ritmo a que os produtos devem entrar na linha.

O cálculo do tamanho ideal do *buffer* da restrição, ilustrado na tabela 5.18, consistiu num processo de tentativa-erro através de várias corridas de simulação. O *buffer*, como explicado anteriormente, significa o período de tempo em que deve ser antecipada a entrada do produto no sistema, relativamente ao seu processamento pelo recurso restritivo. Na linha de produção da FS, como a restrição do sistema é o *set* de máquinas de bobinagem, e porque existem três tipos de bobinagem (V1, V2 e V3) para os cinco modelos em estudo, são indispensáveis três *buffers* da restrição. Assim, são determinados três períodos de tempo, medidos desde a entrada do modelo na linha até à sua chegada à restrição do sistema: o *buffer* V1 será relativo aos modelos 9 e 10 da FS, o *buffer* V2 relativo aos modelos 32 e 33 e por último o *buffer* V3 corresponde ao modelo 7.

A tabela 5.18 indica na terceira coluna o *lead time* atual do início da linha até à restrição (*buffer* da restrição), resultante da simulação realizada no capítulo anterior após o dimensionamento dos

recursos. O valor dos *buffers*, de acordo com a regra referida, foi dividido em dois, e introduzido no novo modelo de simulação que também contém o planeamento calculado pelo *Solver*.

Tabela 5.18: Determinação do *buffer* na restrição

Modelo FS	Tipo de Bobinagem	Buffer Inicial (h)	Metade Buffer Inicial (h)	2ª Configuração do Buffer	Configuração Ideal do Buffer
7	V3	35,12	17,56	17,6	28
9	V1	26,97	13,49	13,5	19,5
10	V1	26,97	13,49	13,5	19,5
32	V2	184,89	92,45	30,8	33,5
33	V2	184,89	92,45	30,8	33,5

O resultado da primeira simulação com o planeamento DBR e os *buffers* calculados pode ser verificado no terceiro cenário da figura 5.16. O *output* resultante, de 163 transformadores, não é minimamente satisfatório e de facto, constatou-se que o valor do *buffer* para os modelos 32 e 33 (92 horas) era extremamente elevado, o que impedia as entidades destes modelos de chegarem ao final da linha no final de cada mês.

Perante este cenário resolveu-se reconfigurar o *buffer* destes modelos, reduzindo-se em 1/3 o valor introduzindo anteriormente, e mantendo os *buffers* dos restantes modelos inalterados (5ª coluna da tabela 5.18). Com o novo *buffer* V2, de 30,8 horas, o resultado melhorou substancialmente (4º cenário da figura 5.16) atingindo-se o objetivo da produção anual, com um *output* de 235 transformadores e um *lead time* de 600,24 horas, bastante inferior ao *lead time* resultante da aplicação do ciclo TOC sem o DBR.

Por último, e devido ao facto de as filas de espera para os processos de bobinagem continuarem elevadas (aproximadamente 100 horas), procurou-se reduzir ainda mais o *lead time* do sistema produtivo, alterando o valor dos *buffers* de modo às entidades não passarem tanto tempo nas filas de espera da restrição. Analisando o resultado do cenário anterior, conhece-se o valor real do *buffer* para cada modelo através dos blocos “Record Buffer V1”, “Record Buffer V2” e “Record Buffer V3”. Como se verifica na figura 5.16, os valores são naturalmente diferentes dos previstos devido à normal variabilidade do sistema.

Assim, procurou-se alterar a dimensão dos *buffers* e aproximá-los aos valores resultantes da simulação. O *buffer* V1 passou de 13,5 horas para 19,5, valor que resulta do bloco “Record Buffer V1” do quarto cenário analisado (Fig. 5.16). Consequentemente o *buffer* V3 foi alterado para 28 horas. Já o *buffer* V2 não pode ser semelhante ao valor resultante da simulação (67 horas), pois como se verificou anteriormente, este valor implica que as entidades dos modelos 32 e 33 não cheguem ao final da linha. Resolveu-se assim aplicar ao *buffer* V2 metade deste valor, ou seja, 33,5 horas. O resultado pode ser verificado no cenário 5 da figura 5.16.

	Scenario Properties		Responses												
	Name	System.Number Out	Lead Time	LT7	LT9	LT10	LT32	LT33	Record Buffer V1	Record Buffer V2	Record Buffer V3	Record Buffer V3 BT	Bobinagem V1.Queue.WaitingTime	Bobinagem AT V2.Queue.WaitingTime	Bobinagem AT.Queue.WaitingTime
1	TOC Final 11 Maq+10 Eq	214.80	622.47	702.4	648.2	499.4	583.9	656.2	26.97	184.89	33.62	36.62	123.55	98.91	151.17
2	DBR Inicio S/Buffers	237.30	732.39	789.5	744.8	600.7	697.8	809.7	22.90	193.93	29.66	32.66	104.89	92.78	114.61
3	DBR Metade Buffer TOC	163.30	462.80	570.7	483.8	418.8	344.7	408.5	14.31	51.85	18.17	21.17	34.76	15.40	40.38
4	DBR 1/3 Buffer V2	235.30	600.24	693.6	665.6	542.7	547.2	591.7	19.50	67.23	27.89	30.89	96.95	97.44	100.39
5	DBR (3) IDEAL	231.90	541.26	630.0	598.8	509.4	476.9	526.9	16.43	55.52	16.47	19.47	73.37	67.51	73.04

Figura 5.16: Resultado das simulações para diferentes valores do *buffer* da restrição

A nova configuração dos *buffers* traduziu-se num *output* que satisfaz a procura anual (232 transformadores) e num reduzido *lead time* de 541,26 horas. De realçar a colossal diferença entre os *lead times* resultantes dos diferentes cenários, apenas com a alteração da dimensão dos *buffers*. O novo cenário produz sensivelmente menos 5 transformadores no final do ano, pois as entidades esperam mais tempo antes de entrar na linha (maiores *buffers*), o que provoca menores filas de espera nos processos de bobinagem e otimiza o *lead time* da FS.

A tabela 5.19 contém um resumo dos resultados globais do caso de estudo. Previamente ao dimensionamento dos recursos através da TOC, com os recursos atuais, a FS apenas conseguirá produzir 119 transformadores. O dimensionamento dos recursos levou o *output* do sistema até mais perto do objetivo, sendo que este só é atingido quando é introduzido o planeamento proveniente do *Solver* (cenário 2 da figura 5.16). Neste cenário, como as entidades são lançadas para o sistema o quanto antes, o *output* do modelo é de 237 transformadores, superior ao objetivo, no entanto o *lead time* da produção é elevadíssimo. Após a introdução dos *buffers*, obtém-se o resultado final do caso de estudo, que satisfaz plenamente os objetivos do mesmo.

Tabela 5.19: Resumo da evolução dos resultados da aplicação da TOC/DBR

Modelo de Simulação	Output no final do ano	Lead Time Médio (h)
Cenário Inicial	119	1506
Após o dimensionamento dos recursos segundo a TOC	215	622
Após a introdução do planeamento da restrição	237	732
Após o DBR	232	541

6. Conclusões e Recomendações

A implementação da Teoria das Restrições nos sistemas produtivos permite o foco das equipas de melhoria no principal responsável pelo desempenho de uma organização, a sua restrição principal. Em organizações que já apliquem conceitos Lean ou 6S, como é o caso da FS, a TOC pode constituir uma ferramenta crucial no aumento das receitas do sistema. Ao contrário dos desperdícios e variações, as receitas não têm limites superiores, o que significa que existe sempre uma restrição por quebrar.

Nesta dissertação foram introduzidos e aplicados os dois primeiros passos da TLS. De seguida sugere-se a implementação de técnicas Lean e 6S na restrição do sistema. Os conceitos da TOC também foram aplicados no dimensionamento dos recursos da linha de produção da FS, tendo em conta a procura prevista. Estas aplicações foram realizadas recorrendo à simulação, mais precisamente ao *software* Arena. A facilidade com que se verificaram diferentes cenários e resultados valida a simulação como ferramenta de extrema relevância no apoio à tomada de decisão.

Conclui-se a partir dos resultados finais, que a identificação da restrição do sistema e o planeamento da entrada de material na linha são fatores decisivos para a gestão das operações numa linha de produção focada na TOC. O recurso que limita um sistema produtivo é, regra geral, facilmente identificado através do estudo das filas de espera e das taxas de utilização. O planeamento além de ter em conta a capacidade da restrição, necessita ainda de acomodar a variabilidade presente no sistema, o que é efetuado através de *buffers* medidos em unidades temporais. Como o caso de estudo demonstrou, a dimensão dos *buffers* é um fator preponderante no desempenho do sistema produtivo de uma organização tanto ao nível do seu *output* como do *lead time* da produção. Outra característica decisiva no DBR é o desenvolvimento de uma programação realística para o “tambor”, neste caso de estudo elaborado com recurso ao *Solver* do *Microsoft Excel*.

Por fim, a aplicação dos conceitos Teoria das Restrições na simulação do sistema da FS permitiu dimensionar os recursos para um *output* de 216 produtos finais. De seguida, o *Drum-Buffer-Rope* permitiu atingir o objetivo, uma produção aproximada de 232 transformadores ao longo de um ano. Determinante para um bom desempenho da linha de produção é o cálculo do tamanho ideal dos *buffers*. Verificou-se que a regra de cortar para metade o tamanho inicial dos *buffers*, antes da aplicação do DBR, nem sempre produz um resultado satisfatório, dependendo muito das características do próprio sistema. Propõe-se assim que o cálculo do tamanho ideal dos *buffers* seja sujeito a um maior número de estudos.

Na presente dissertação as dificuldades prenderam-se com a inexistência de um mapa real de prazos entrega dos produtos ao cliente. Este facto não permitiu calcular o plano da restrição a partir das datas de entrega. Aconselha-se a sua utilização num futuro trabalho. Na continuação do caso de estudo indica-se a possibilidade de desenvolver o *Buffer Management* para uma melhor definição do *buffer* da restrição.

Na presente dissertação foi ainda proposta e utilizada uma metodologia, recorrendo a múltiplos testes de hipótese, para analisar os dados recolhidos da organização e reproduzir mais corretamente o comportamento da linha de produção no modelo de simulação, em particular a variabilidade existente na mesma. Este estudo permitiu concluir que apesar sua ampla utilização, a distribuição normal não é a mais apropriada para estudar fontes de aleatoriedade dos sistemas produtivos, como os tempos de processamento.

A restrição do sistema limita a organização de realizar o seu propósito. As ações de melhoria devem-se assim focar neste elemento, principalmente quando existe elevada variabilidade e interdependências entre os elementos do sistema.

Referências Bibliográficas

- Arnold, T., & Emerson, J. (2011). Nonparametric Goodness-of-Fit Tests for Discrete Null Distributions. *R Journal*, 3(2), 34-39.
- Bhardwaj, A., Gupta, A., & Kanda, A. (2010). Drum-Buffer-Rope: The Technique to Plan and Control the Production Using Theory of Constraints. *World Academy of Science, Engineering and Technology* (45), 103-106.
- Biller, B., & Gunes, C. (2010). Introduction to simulation input modeling. *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2010 Winter*, 49-58. doi: 10.1109/WSC.2010.5679176
- Cheng, L. (2002). Line balancing vs. theory of constraints. *IIE Solutions*, 34(4), 30.
- Chung, C. (2003). *Simulation Modeling Handbook: A Practical Approach*. Taylor & Francis.
- Corbett, T., & Csillag, J. (2001). Analysis of the effects of seven Drum-Buffer-Rope Implementations. *Production & Inventory Management Journal*, 42(3/4), 17-23.
- Cox, J., & Schleier, J. (2010). Theory of Constraints Handbook. from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=329972>
- D'Agostino, R., & Belanger, A. (1990). A Suggestion for Using Powerful and Informative Tests of Normality. *The American Statistician*, 44(4), 316-321. doi: 10.1080/00031305.1990.10475751
- Ehie, I. (2005). Integrating six sigma and theory of constraints for continuous improvement: a case study. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 16(5), 542-553.
- Fischer, T., & Kamps, U. (2013). Power maps in goodness-of-fit testing. *Computational Statistics*, 28(3), 1365-1382. doi: 10.1007/s00180-012-0361-x
- Goldratt, E. (1990). *The Haystack Syndrome: Sifting information out of the data ocean*. Croton-on-Hudson, N.Y.: North River Press.
- Goldratt, E., & Cox, J. (2004). *The goal: a process of ongoing improvement* (3rd rev. ed.). Aldershot: Gower.
- Goldratt, E., & Fox, R. (1986). *The Race*. Croton-on-Hudson, N.Y.: North River Press.
- Goldratt Institute, A. (2009). Combining Lean, Six Sigma, and the Theory of Constraints to Achieve Breakthrough Performance [Press release]. Retrieved from <https://www.goldratt.com/pdfs/CombiningLSSandTOC.pdf>
- Greenwood, A., & Beaverstock, M. (2011). Simulation education - seven reasons for change. *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2011 Winter*, 20-28.
- Gupta, A., Bhardwaj, A., & Kanda, A. (2010). Fundamental Concepts of Theory of Constraints: An Emerging Philosophy. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 46, 686-692.
- Heizer, J., & Render, B. (2004). *Principles of Operations Management* (5th ed.). Upper Saddle River, N.J.; [Great Britain]: Pearson/Prentice Hall.
- Hopp, W., & Spearman, M. (2001). *Factory Physics : foundations of manufacturing management* (2nd ed.). Boston: Irwin/McGraw-Hill.
- Ingalls, R. (2011). Introduction to simulation. *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2011 Winter*, 1374-1388. doi: 10.1109/WSC.2011.6147858
- Jahangirian, M., Eldabi, T., Naseer, A., Stergioulas, L., & Young, T. (2010). Simulation in Manufacturing and Business: A review. *European Journal of Operational Research*, 203(1), 1-13. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.06.004>

- Kasemset, C. (2011). A review on quality improvement and Theory of Constraints (TOC). *Quality and Reliability (ICQR)*, 2011 IEEE International Conference on, 327-330, IEEE. doi: 10.1109/ICQR.2011.6031735
- Kelton, W., Sadowski, R., & Sadowski, D. (2002). *Simulation with Arena* (2nd ed.). Boston: McGraw-Hill.
- Kuhl, M., Lada, E., Wagner, M., Ivy, J., Steiger, N., & Wilson, J. (2009). Introduction to modeling and generating probabilistic input processes for simulation. *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2009 Winter*, 184-202.
- Law, A. (2007). *Simulation modeling and analysis* (4th ed.). Boston: McGraw-Hill.
- Law, A. (2009). How to build valid and credible simulation models. *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2009 Winter*, 24-33, IEEE. doi: 10.1109/WSC.2009.5429312
- Law, A. (2012). A tutorial on how to select simulation input probability distributions. *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2012 Winter*, 1-15, IEEE. doi: 10.1109/WSC.2012.6465281
- Lean Enterprise Institute, I. (2008). Backsliding is Back as the Biggest Obstacle to Lean Transformations [Press release]. Retrieved from http://www.lean.org/WhoWeAre/NewsArticleDocuments/Obstacles_addendum_release08.pdf
- Levinson, W. (2007). *Beyond the theory of constraints : how to eliminate variation and maximize capacity*. New York: Productivity Press.
- Lucas, D., & Tenera, A. (2014). Input Analysis in Simulation: A Case Study based on the Variability in Manufacturing Lines. *Proceedings of the Eighth International Conference on Management Science and Engineering Management*, 465-477. Springer Berlin Heidelberg.
- Mabin, V., & Balderstone, S. (2000). *The World of the theory of constraints : a review of the international literature*; London: St Lucie Press.
- McCrum-Gardner, E. (2008). Which is the correct statistical test to use? *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 46(1), 38-41. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bjoms.2007.09.002>
- McMullen, T. (1998). *Introduction to the theory of constraints (TOC) management system*. London: St. Lucie.
- Montgomery, D., & Runger, G. (1999). *Applied statistics and probability for engineers* (2nd ed.): New York: John Wiley & Sons.
- Nave, D. (2002). How To Compare Six Sigma, Lean and the Theory of Constraints. *Quality Progress*, 35, 73-80.
- Noughabi, H., & Arghami, N. (2010). Monte Carlo comparison of seven normality tests. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 81(8), 965-972. doi: 10.1080/00949650903580047
- Ohno, T. (1988). *Toyota Production System:beyond large-scale production*. Cambridge, Mass.: Productivity Press.
- Pereira, A. (2010). *Configuração e balanceamento de linhas de produção flexíveis*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial), Universidade Nova Lisboa, FCT-UNL.
- Pereira, Z., & Requeijo, J. (2008). *Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos*, Lisboa: FCT-UNL e Prefácio.
- Pirasteh, R., & Farah, K. (2006). Continuous improvement trio: the top elements of TOC, lean, and six sigma make beautiful music together. *APICS - The Performance Advantage*, 16(5), 31-33.
- Rahman, S. (1998). A review of the theory of constraints philosophy and its application. *International Journal of Operations & Production Management*, 18(4), 336-355.

- Ramos, M. (2010). *Sincronização da Cadeia de Valor através da Integração da Teoria das Restrições e Produção Lean*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial), FCT-UNL. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10362/10021>
- Razali, N., Shamsudin, N., Azid, N., Hadi, A., & Ismail, A. (2012). A comparison of normality tests using SPSS, SAS and MINITAB: An application to Health Related Quality of Life data. *Statistics in Science, Business, and Engineering (ICSSBE), 2012 International Conference on*, 1-6. IEEE.
- Razali, N. & Wah, Y. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21-33. doi: citeulike-article-id:12686206
- Reis, E. (2001). *Estatística Aplicada : vol. 2* (4ª edição revista). Portugal, Lisboa: Edições Sílabo.
- Ricketts, J. (2008). *Reaching the Goal : how managers improve a services business using Goldratt's theory of constraints*. Upper Saddle River, NJ: IBM Press.
- Roldão, V., & Ribeiro, J. (2007). *Gestão das Operações uma abordagem integrada*. Lisboa: Monitor.
- Romão, X., Delgado, R., & Costa, A. (2009). An empirical power comparison of univariate goodness-of-fit tests for normality. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 80(5), 545-591. doi: 10.1080/00949650902740824
- Schrageheim, E., & Ronen, B. (1990). Drum-buffer-rope shop floor control. *Production and Inventory Management Journal*, 31(3), 18-22.
- Schrageheim, E., & Ronen, B. (1991). Buffer-management : a diagnostic tool for production control. *Production and Inventory Management*, 74-79.
- Schriber, T., Brunner, D., & Smith, J. (2012). How discrete-event simulation software works and why it matters. *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2012 Winter*, 1-15. IEEE.
- Schroeder, R., Linderman, K., Liedtke, C., & Choo, A. (2008). Six Sigma: Definition and underlying theory. *Journal of Operations Management*, 26(4), 536-554. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jom.2007.06.007>
- Skoogh, A., Perera, T., & Johansson, B. (2012). Input data management in simulation – Industrial practices and future trends. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 29(0), 181-192. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2012.07.009>
- Sproull, R. (2009). *The ultimate improvement cycle : maximizing profits through the integration of lean, six sigma, and the theory of constraints*. CRC Press.
- Stamm, M., Neitzert, T., & Singh, D. (2009). TQM, TPM, TOC, Lean and Six Sigma - evolution of manufacturing methodologies under the paradigm shift from Taylorism/Fordism to Toyotism.
- Steele, M., & Chaseling, J. (2006). Powers of Discrete Goodness-of-Fit Test Statistics for a Uniform Null Against a Selection of Alternative Distributions. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 35(4), 1067-1075. doi: 10.1080/03610910600880666
- Stopper, M., & Stuja, K. (2004). Optimizing Cycle Time of a Flexible Manufacturing Cell Using Simulation Software. *Proceedings of the 4th International DAAAM Symposium*, 159-160.
- Swain, J. (2011). Discrete event simulation software tools: Back to the future. *OR/MS Today*, 38(5), 56-69.
- Swain, J. (2013). Simulation Software Survey - Simulation: a better reality? *OR/MS Today*, 40(5).
- Tenera, A. (2006). *Contribuição para a Melhoria da Gestão da Incerteza na Duração dos Projetos através da Teoria das Restrições*. (Tese de Dissertação em Engenharia Industrial), Universidade Nova Lisboa, Faculdade Ciências e Tecnologia.
- TOCICO. (2012) *The Theory of Constraints International Certification Organization Dictionary* (Second ed.). McGraw-Hill Education.

- Vasudevan, K., Lote, R., Williams, E., & Ulgen, O. (2009). High speedbottle manufacturing lines: Case studies and simulation software selection techniques. *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2009 Winter*, 322-332. doi: 10.1109/WSC.2009.5429343
- Wang, Y., Cao, J., & Kong, L. (2009). Hybrid Kanban/Conwip control system simulation and optimization based on theory of constraints. *Intelligent Computing and Intelligent Systems, 2009. ICIS 2009. IEEE International Conference on*, 666-670. IEEE. doi: 10.1109/ICICISYS.2009.5358303
- Watson, K., Blackstone, J., & Gardiner, S. (2007). The evolution of a management philosophy: The theory of constraints. *Journal of Operations Management*, 25(2), 387-402. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jom.2006.04.004>
- White, K., & Ingalls, R. (2009). Introduction to simulation. *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2009 Winter*, 12-23. doi: 10.1109/WSC.2009.5429315
- Woeppel, M. (2009). How to Double Your Bottom Line with TLS. <http://pinnacle-strategies.com/blog/2009/08/how-to-double-your-profits-with-tls-theory-of-constraints-Lean-six-sigma/>
- Womack, J., & Jones, D. (2003). *Lean thinking : banish waste and create wealth in your corporation*. New York: Free Press.
- Wu, H., Chen, C., Tsai, C., & Yang, C. (2010). Simulation and scheduling implementation study of TFT-LCD Cell plants using Drum-Buffer-Rope system. *Expert Systems with Applications*, 37(12), 8127-8133. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2010.05.075>
- Youngman, K. (2009). *A Guide to Implementing the Theory of Constraints (TOC)*. 2014, from <http://www.dbrmfg.co.nz/>
- Zhao, J., Xu, X., & Ding, X. (2010). New Goodness of Fit Tests Based on Stochastic EDF. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 39(6), 1075-1094. doi: 10.1080/03610920902846554

Anexo

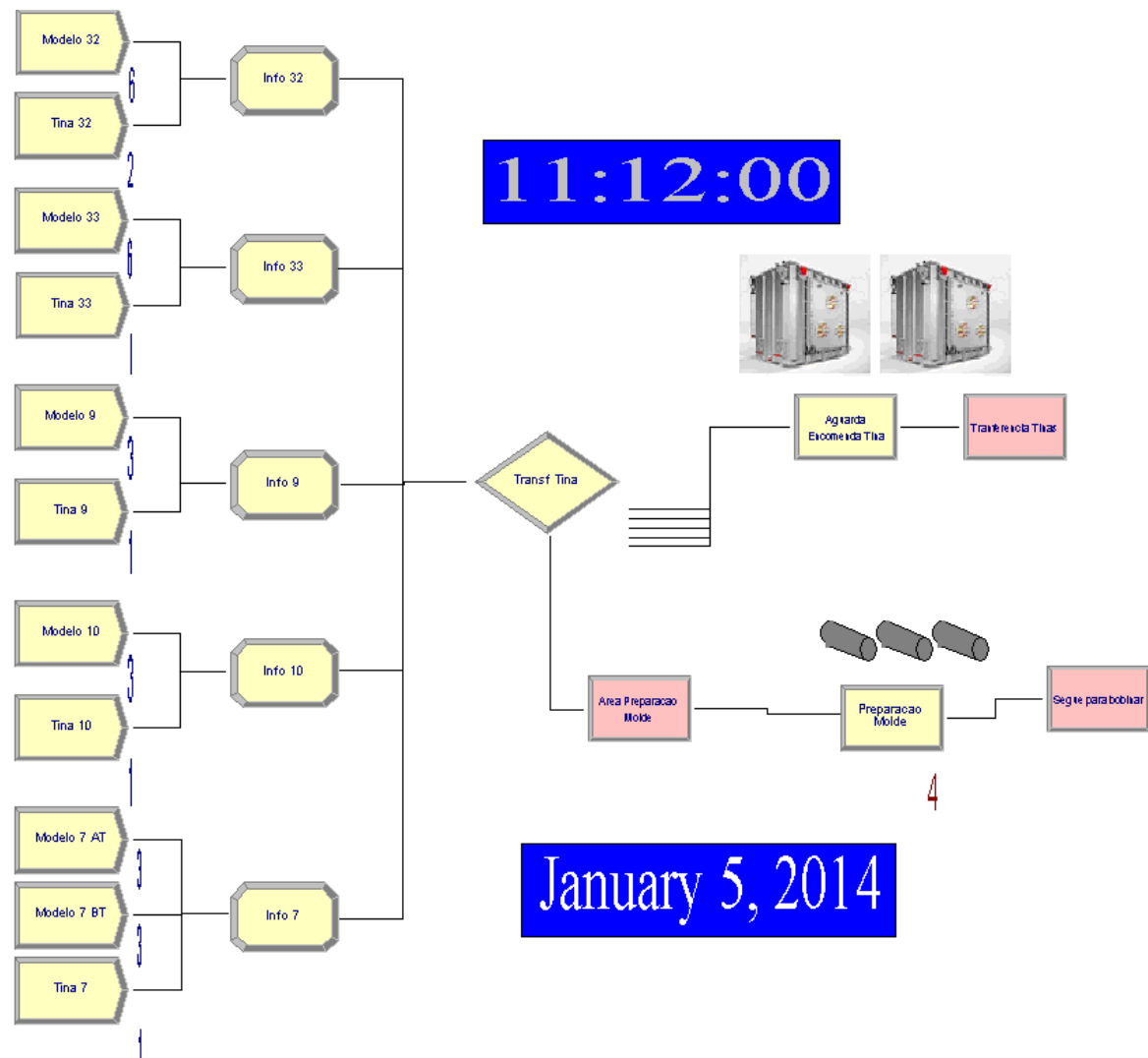


Figura A.I.0.1: Modelação da entrada das entidades no sistema

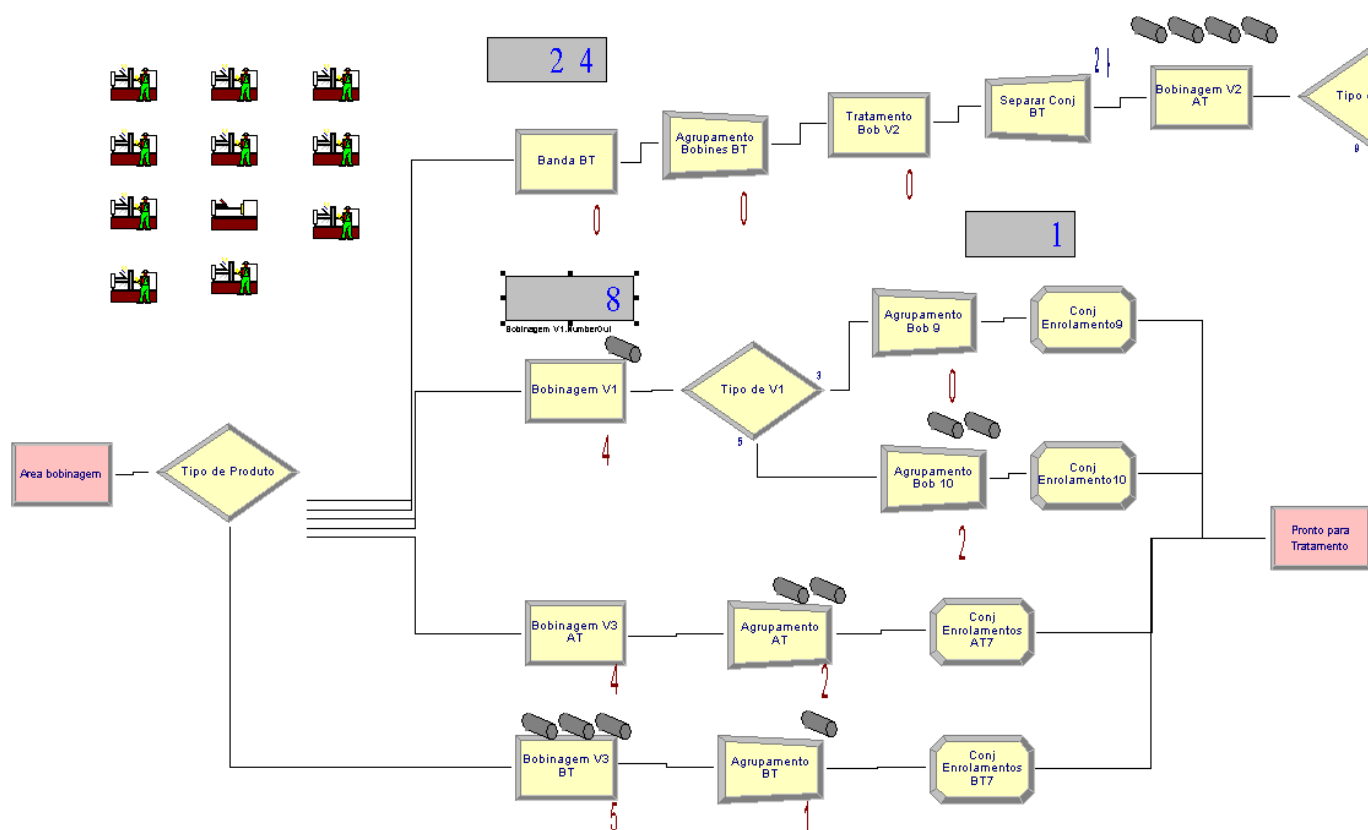


Figura A.I.0.2: Representação da área de bobinagem no modelo do Arena

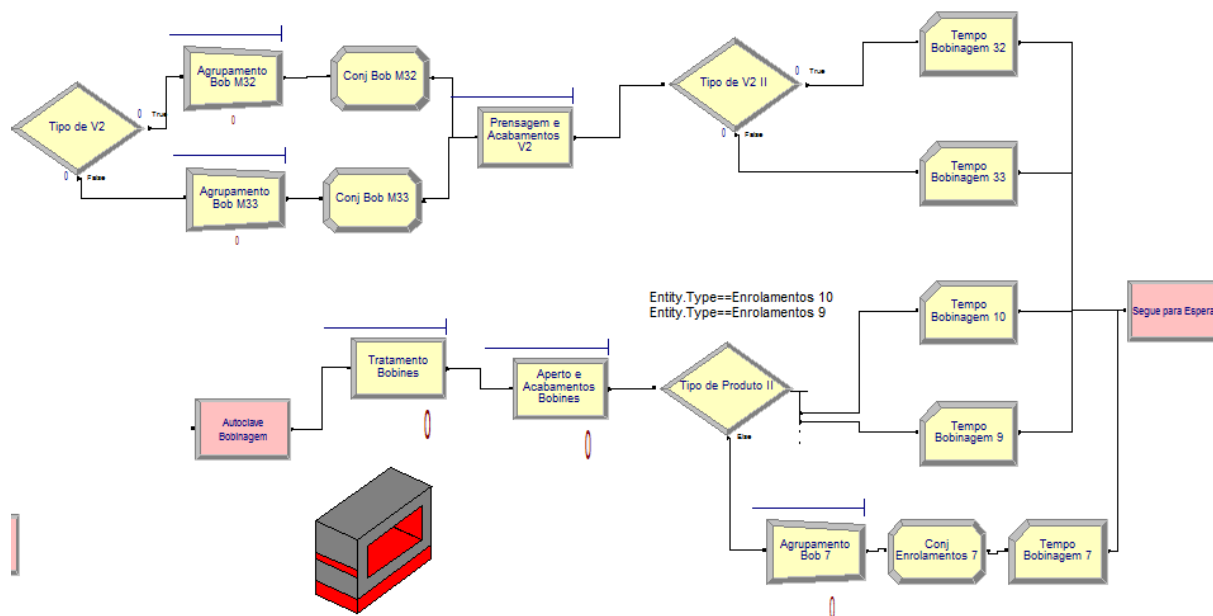


Figura A.I.0.3: Representação final da área de bobinagem

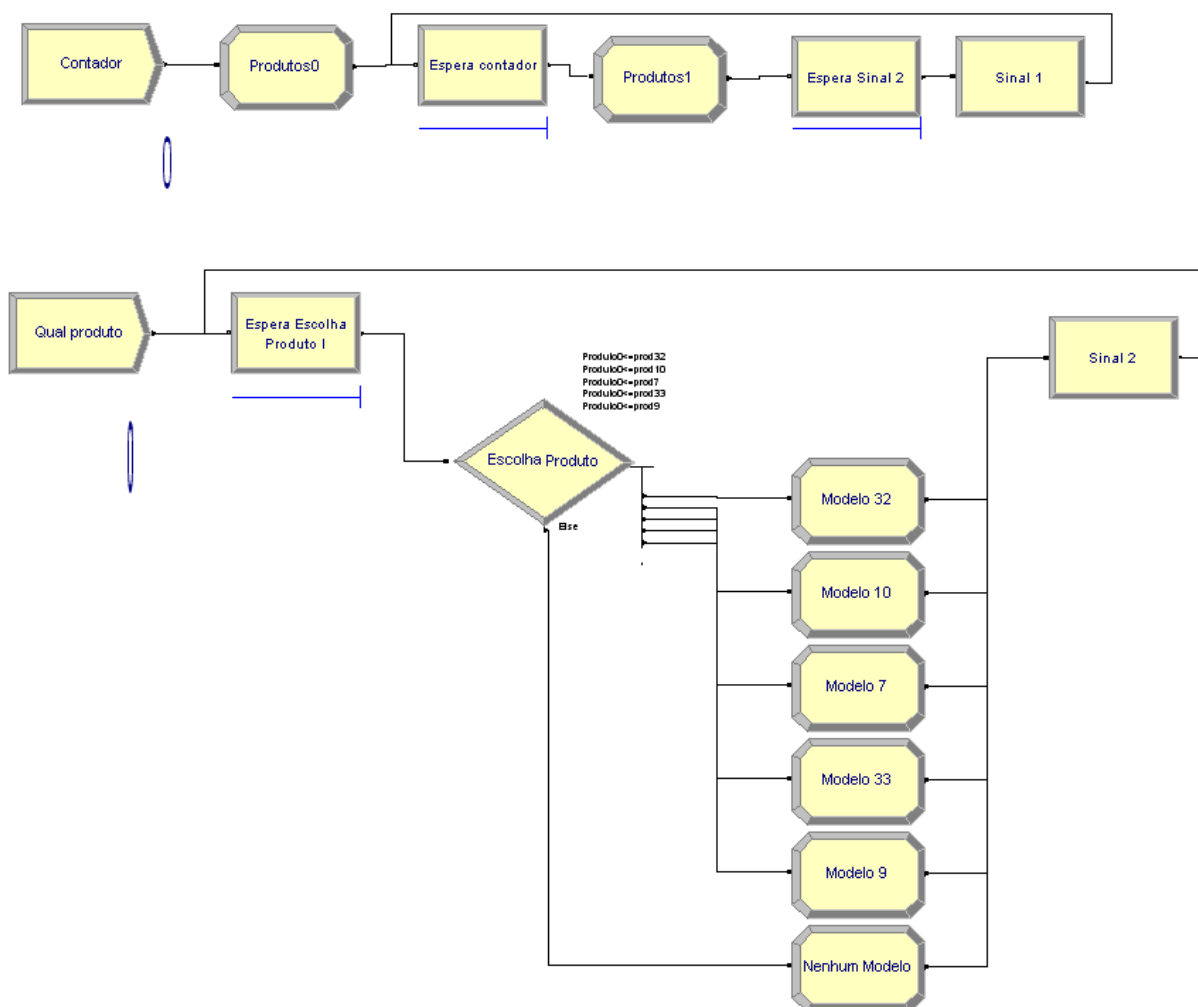


Figura A.I.0.4: Representação da atribuição do modelo da FS a cada entidade criada

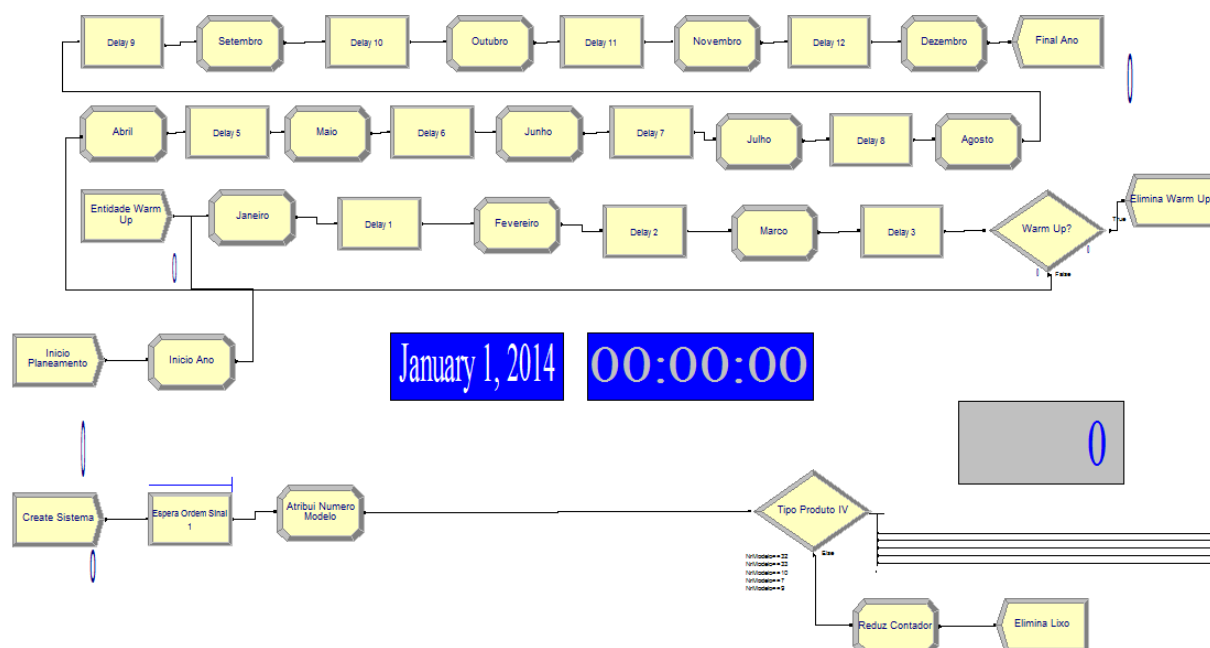


Figura A.I.0.5: Modelação da informação relativa ao planeamento mensal da FS